INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | ENERO 2020 | N.º 520
CRISTALES TEMPORALES | VIDA EN EL DESIERTO DE ATACAMA | EPIGENÉTICA Y EVOLUCIÓN

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Enero 2020 • N.º 520 • 6,90 € • investigacionyciencia.es
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CRISTALES EN EL TIEMPO

Nuevos experimentos confirman la existencia de un insólito estado de la materia

EXTREMÓFILOS
Vida oculta en el desierto de Atacama

MATEMÁTICAS
¿Es inevitable la desigualdad económica?

BIOLOGÍA
El papel de la epigenética en la evolución





ciclo de
conferencias y debates en

ciencias

FUNDACIÓN RAMÓN ARECES

Por duodécimo año consecutivo, la Fundación Ramón Areces y Springer Nature, unidos con el objetivo de impulsar la divulgación científica, organizan conjuntamente un ciclo de conferencias y debates en ciencias en los que se abordan cuestiones de actualidad, trasladando a la sociedad innovadores temas científicos y los avances más importantes en estas áreas, tratadas por grandes expertos internacionales.

Con esta iniciativa, la Fundación Ramón Areces y Springer Nature no solo tienen la intención de promover unas jornadas de debate científico o médico, sino de generar una reflexión colectiva sobre materias que, en mayor o menor grado, afectan a toda la sociedad. En este sentido, se pretende presentar estos avances científicos, interpretándolos y traduciéndolos desde la perspectiva de los beneficios y las ventajas que pueden suponer para el bienestar y la calidad de vida de la sociedad, pero también desde sus posibles riesgos e inconvenientes, destacando e incidiendo en la importancia de la investigación en su progreso.

SENSORES BIOMIMÉTICOS

Su uso y potencial en Medicina



Las interfaces biomiméticas, como los sensores cutáneos o los que se pueden ingerir, han revolucionado nuestra capacidad para monitorizar tejidos humanos de forma mínimamente invasiva y continua, y ofrecen grandes oportunidades para avanzar en el conocimiento y tratamiento de muchas enfermedades. Hasta ahora, la Medicina occidental se ha basado principalmente en estudios de la población enferma (pacientes) monitorizados en un ambiente hospitalario. Con el advenimiento de dispositivos electrónicos y materiales capaces de medir parámetros fisiológicos de forma continuada y poco invasiva, se abren nuevas oportunidades para entender la salud, además de la enfermedad, y para estudiar grupos más amplios y representativos de la población global. Estas herramientas están inspiradas en el funcionamiento de los sistemas biológicos, ya que son capaces de monitorizar los patrones fisiológicos y responder de forma precisa a estímulos biofísicos. Estos dispositivos ofrecen esperanza para muchos pacientes, como aquellos que sufren diabetes o enfermedades neurológicas, y representan una ventana para el avance en el conocimiento del cuerpo y la mente humanos.

En esta 12.ª conferencia reuniremos a expertos en ingeniería, biomedicina y bioética para discutir las novedades en el desarrollo de dispositivos biomiméticos avanzados, incluyendo dispositivos capaces de monitorizar fluidos humanos a través de la piel (sudor, saliva o lágrimas) o de ser ingeridos, y su aplicación para monitorizar y tratar enfermedades como la diabetes.

FUNDACIÓN RAMÓN ARECES
SPRINGER NATURE

SENSORES BIOMIMÉTICOS

Su uso y potencial en Medicina

BIOMIMETIC SENSORS

Their use and potential in Medicine

Madrid
Jueves, 6 de febrero de 2020
17:30 h.

INFORMACIÓN E INSCRIPCIONES
www.fundacionareces.es
C/ Vitruvio, 5 • 28006 Madrid
Metro: República Argentina / Gregorio Marañón
91 515 89 80
Fecha de inscripción: hasta el 5 de febrero de 2020

Intervenciones

Introducción
Moderadora
Erika Pastrana
Directora Editorial, Nature Journals, Applied and Chemistry, Nature Research. Nueva York (EE.UU.).

Nuevos materiales y dispositivos de interacción cerebral
Prof. George Malliaras
Profesor de Tecnología en Prince Philip. División de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Cambridge. Cambridge (Reino Unido).

Creando un nuevo paradigma para tratar enfermedades neurológicas: terapia cerebral personalizada
Ana Maiques
Socia Fundadora y Directora Ejecutiva. Neuroelectrics. Barcelona (España) y Massachusetts (EE.UU.).

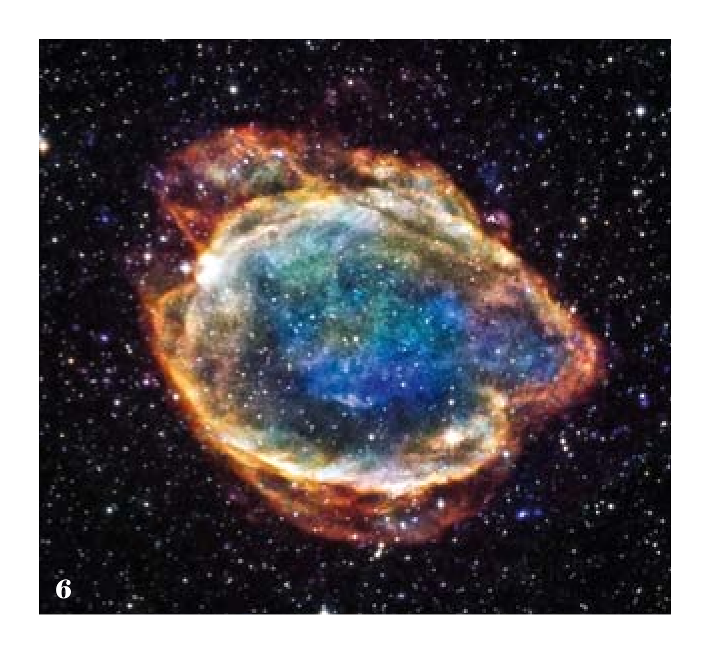
Sensores basados en el microbioma cutáneo
Dr. Marc Güell Cargol
Departamento de Ciencias Experimentales y de la Salud. Universitat Pompeu Fabra. Barcelona (España).

Sensores microbioelectrónicos ingeribles para el seguimiento y diagnóstico de enfermedades
Dra. Rabia Tugce Yazicigil
Profesora adjunta. Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática. Universidad de Boston. Boston (EE.UU.).



ARTÍCULOS

FELIPE VILLEGAS, INSTITUTO HUMBOLDT







INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Varios trabajos recientes han conseguido crear los primeros prototipos genuinos de «cristales temporales»: exóticos estados de la materia propuestos por primera vez en 2012 y caracterizados por repetirse cíclicamente en el tiempo. El logro abre las puertas a fabricar relojes mucho más precisos que los actuales y los avances teóricos en el campo prometen aplicaciones en otras disciplinas, como la física fundamental o la cosmología. Ilustración de Mark Ross Studio.



redaccion@investigacionyciencia.es



Junio 2019

UN MEDICAMENTO PARA REGENERAR TEJIDOS

En «Regeneración de órganos con fármacos» [Investigación y Ciencia, junio de 2019], Kevin Strange y Viravuth Yin discuten el compuesto MSI-1436, el cual facilita que el propio cuerpo regenere células mediante el bloqueo de la enzima tirosina fosfatasa 1B (PTP1B). El artículo se centra en las investigaciones relativas a la distrofia muscular. Me pregunto si los estudios sobre el MSI-1436 podrían también aplicarse a trastornos como la artritis o a lesiones de la médula espinal.

Chris Schofield

Responde Strange: *La PTP1B se expresa en prácticamente todos los tipos de tejidos y células. Allí inhibe la señalización de las tirosinas cinasas receptoras (RTK), las cuales activan múltiples procesos celulares que deben operar coordinados para que se produzca la regeneración. Al inhibir la PTP1B, el compuesto MSI-1436 aumenta la actividad de varias rutas celulares reguladas por las RTK y que resultan necesarias para la regeneración de tejidos.*

A la vista de lo anterior, sospechamos que el MSI-1436 podría ser de utilidad para tratar distintas enfermedades en las que estimular la reparación y la regeneración de tejidos tuviese un valor terapéutico. No obstante, confirmar esta hipótesis exigirá una enorme cantidad de estudios sumamente cuidadosos. Hasta la fecha, nuestro trabajo se ha centrado en las lesiones cardíacas y del músculo esquelético.

MÁS GALAXIAS SIN MATERIA OSCURA

En el artículo «¿Una galaxia sin materia oscura?» [Investigación y Ciencia, diciembre de 2019], Ignacio Trujillo expone la solución encontrada por su grupo de investigación al enigma planteado en 2018 por un trabajo que afirmaba haber hallado una galaxia enana sin materia oscura. Según explica, el problema desaparecería si la distancia a la galaxia en cuestión fuera de unos 13 megapársecs en vez de los 20 megapársecs que suponía el estudio inicial.

¿Cuál es la explicación física que hace que la materia oscura «reaparezca» si la galaxia se encuentra más cerca de lo supuesto en un principio?

Por otro lado, un artículo publicado hace muy poco en *Nature Astronomy* [«Further evidence for a population of dark-matter-deficient dwarf galaxies»; Qi Guo et al., 25 de noviembre de 2019] ha afirmado haber encontrado otras 19 galaxias enanas sin materia oscura. ¿Se encuentra relacionado este caso con el analizado por Trujillo y su grupo? ¿Podría darse en él el mismo problema de la medición de distancias?

David Arroyo
Valencia

Responde Trujillo: *No es la materia oscura la que aparece o desaparece según la distancia. Lo que cambia es nuestra estimación de cuántas estrellas hacen falta para producir la luz que vemos. Si el objeto está lejos, necesitamos más estrellas para explicar el mismo brillo, y por tanto la cantidad de masa en forma de estrellas será mayor. Y al haber más materia visible, no se requiere materia oscura para dar cuenta de la masa dinámica de la galaxia. Por el contrario, si el objeto se encuentra más cerca de nosotros, el número de estrellas que hacen falta para explicar su brillo es menor, lo que obliga a postular la existencia de materia oscura para entender la dinámica de la galaxia.*

En lo que respecta al artículo de Guo y sus colaboradores, en esta ocasión el problema no es la distancia, sino una incorrecta estimación de la inclinación de las galaxias, un factor que hace falta tener en cuenta para estimar su masa dinámica. Los autores han supuesto que las galaxias observadas son de tipo disco. Sin embargo, las galaxias conocidas de esta clase suelen tener una forma más elipsoidal. Una vez se toma en consideración este efecto, la cantidad de materia oscura inferida para estas galaxias vuelve a ser la normal. Mi colega del Instituto de Astrofísica de Canarias Jorge Sánchez Almeida ha enviado hace unos días un artículo a una revista especializada desarrollando esta explicación.



Diciembre 2019

Errata corrige

En el artículo **Mejores fotos submarinas** [Apuntes; Investigación y Ciencia, diciembre de 2019], de Erik Olsen, se afirmaba que los resultados referidos se habían presentado en una conferencia celebrada en Nueva Jersey. La localización correcta es California.

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

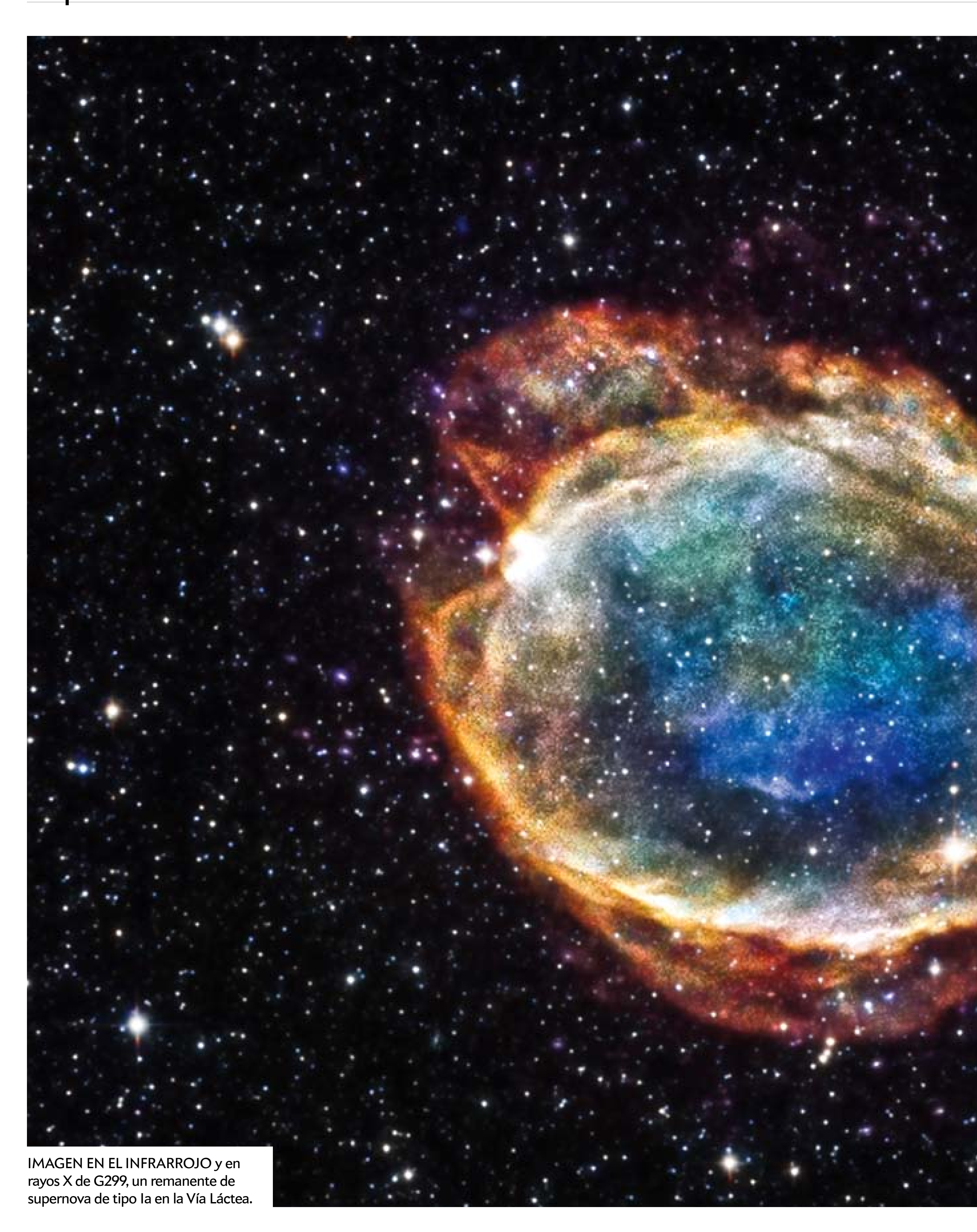


IMAGEN EN EL INFRARROJO y en rayos X de G299, un remanente de supernova de tipo Ia en la Vía Láctea.

NASA/OBSERVATORIO CHANDRA/UNIVERSIDAD DE TEXAS/S. POST ET AL. (*rayos X*); 2MASS/UNIVERSIDAD DE MASSACHUSETTS/IPAC-CALTECH/NASA/FUNDACIÓN NACIONAL PARA LA CIENCIA DE EE.UU. (*infrarrojo*)

ASTRONOMÍA

El mapa de una supernova

Una nueva herramienta permite cartografiar en 3D los elementos químicos que dejan las estrellas que han explotado

Cuando una enana blanca absorbe suficiente material de una estrella cercana, acaba sufriendo una violenta explosión conocida como supernova de tipo Ia. Estos estallidos estelares arrojan al espacio elementos químicos recién sintetizados que se mezclan con el gas interestelar y que acabarán incorporándose a las estrellas y las galaxias. Sin embargo, los astrofísicos aún no conocen con todo detalle las condiciones físicas bajo las que se producen estas explosiones.

En un trabajo reciente, Ivo Seitenzahl, astrofísico de la Universidad de Nueva Gales del Sur en Canberra, y sus colaboradores han usado el recién renovado Telescopio Muy Grande (VLT), en Chile, para cartografiar en 3D y con un detalle sin precedentes las gigantescas nubes de residuos que dejan los estallidos de supernova. Tales representaciones permiten «rebobinar» el proceso e inferir las propiedades fundamentales de la estrella que explotó, incluida su masa y la energía liberada, explica Carles Badenes, astrofísico de la Universidad de Pittsburgh que no participó en el estudio.

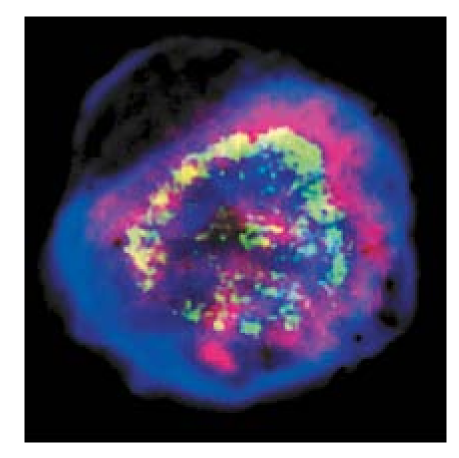
Cuando se produce una supernova de esta clase, desde la enana blanca salen disparados elementos químicos pesados a velocidades supersónicas. Ello genera una onda de choque dirigida hacia fuera, a través del gas y el polvo interestelar circundante, y otra que rebota en los restos de la explosión, lo que calienta la materia expulsada hasta temperaturas que causan la emisión de rayos X. El análisis de esa radiación permite determinar la composición química del remanente de supernova. Sin embargo, los instrumentos actuales carecen de la resolución necesaria para medir cómo se mueve el material eyectado.

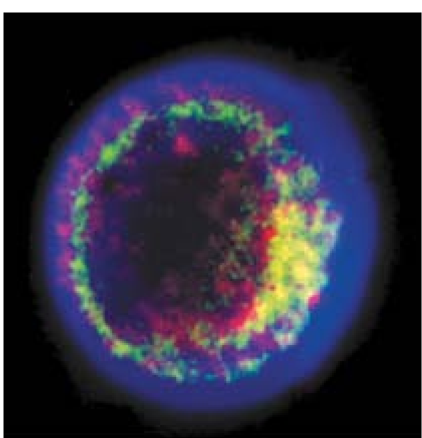
El grupo de Seitenzahl ha usado las observaciones en luz visible del VLT para analizar remanentes de supernova con una nueva técnica descrita el pasado mes de julio en *Physical Review Letters*. Los modelos sugieren que las supernovas de tipo Ia producen la mayor parte del hierro del universo. Y este debería estar tanto más ionizado cuanto más atrás de la onda de choque se encuentre, lo que tendría que ir acompañado de la emi-

sión de ciertas frecuencias distintivas de luz visible. Hasta ahora, sin embargo, esas emisiones eran demasiado débiles para que los telescopios pudieran captarlas.

Gracias a las recientes mejoras técnicas que ha experimentado el VLT, los investigadores lograron observar capas concéntricas de iones de hierro en varios remanentes de supernova de la Gran Nube de Magallanes, una galaxia enana satélite de la Vía Láctea. A partir de la forma en que se distorsionaba dicha luz, determinaron por primera vez la velocidad de la onda de choque inversa (la dirigida hacia el interior) en el remanente de una supernova de tipo Ia. «Es ciencia emocionante, hecha posible gracias a la tecnología y aplicada justamente al tipo de supernova que más lo requiere», apunta Dan Milisavljevic, astrónomo de la Universidad Purdue que tampoco participó en el trabajo.

El grupo de Seitenzahl también descubrió una supernova originada a partir de una enana blanca cuya masa habría sido menor de la que se consideraba necesaria para desencadenar la explosión, lo que sugiere que aún es mucho lo que los astrónomos pueden aprender sobre estos estallidos. En el futuro, otros trabajos podrían revelar más detalles acerca de las sustancias producidas en las supernovas de tipo Ia, si la explosión se inicia en la superficie o en el interior de la estrella, así como las condiciones precisas que la desencadenan. —*Rachel Berkowitz*





LUZ EMITIDA por dos remanentes de supernova. El color verde indica la presencia de iones de hierro.

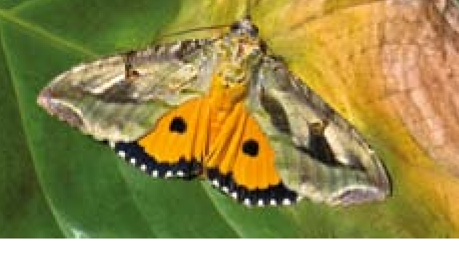
BIOFÍSICA

Alas encubiertas

Una especie de polilla nocturna oculta un llamativo secreto

***Eudocima materna*,** una polilla nocturna caracterizada por la presencia de un punto negro en cada una de sus alas traseras, parece emplear una sigilosa táctica para atraer parejas en la oscuridad. Un estudio publicado el pasado mes de septiembre en *Current Biology* ha referido el hallazgo de tres manchas en las alas delanteras de los machos, cuya tonalidad y tamaño varían cuando se observan desde ciertos ángulos. En las hembras, por el contrario, se oscurece el ala entera.

Es conocido que las especies diurnas de mariposas y polillas se sirven de efectos visuales dinámicos para comunicarse. Pero hasta ahora se pensaba que, debido a la falta de luz, sus parientes nocturnos dependerían casi exclusivamente de señales químicas. Sin embargo, estas alas con dibujos cambiantes, observadas por primera vez en una polilla nocturna, hacen pensar que también estos insectos emplean señales visuales. Y dado que solo los machos exhiben las manchas, los investigadores creen que probablemente se trate de un rasgo seleccionado sexualmente.



LAS ALAS DELANTERAS de *Eudocima materna* presentan un aspecto u otro según desde dónde se observen.

La ecóloga de la Universidad de Australia Occidental Jennifer Kelley y sus colaboradores advirtieron por primera vez el llamativo fenómeno mientras estudiaban especímenes museísticos de polillas para otro proyecto. «En cuanto nos percatamos de que el efecto dependía del ángulo, supimos que para entenderlo debíamos analizar la óptica subyacente», explica Kelley. Para ello, los investigadores contactaron con Gerd Schröder-Turk, físico de materiales de la también australiana Universidad Murdoch, y Bodo Wilts, experto en nanofotónica del Instituto Adolphe Merkle, en Suiza.

Los investigadores analizaron los efectos ópticos generados en el ala de la polilla hasta escalas nanométricas. Al observarlas desde arriba, las escamas reflejan completamente la luz, al igual que un espejo ordinario. Sin embargo, cuando se miran desde cierto ángulo, permiten que una fracción de la luz las atraviese, lo que deja atisbar una capa más profunda de escamas oscuras que, en las alas del macho, se ven como manchas. Si el insecto bate las alas vigorosamente, un comportamiento habitual entre los machos que se acercan a posibles parejas, esas manchas aparecen y desaparecen, lo que genera una llamativa señal visual incluso con muy poca luz.

«Estas polillas han desarrollado una magnífica solución para dejarse ver en secreto», asegura Elizabeth Tibbetts, ecóloga conductual de la Universidad de Michigan que no participó en el estudio. «Su señal es muy clara desde una determinada dirección, pero invisible desde otras. Eso permite al macho anunciar su presencia a las hembras sin que los depredadores lo detecten.»

—*Harini Barath*

I. R. SEITENZAHL ET AL. (*remanentes de supernova*); K. JAYARAM, SCIENCE SOURCE (*polilla*)

MATERIALES

Bucle cuántico

Las extrañas propiedades de un nuevo material podrían resultar útiles para construir futuros ordenadores cuánticos



Los superconductores son materiales en los que los electrones fluyen sin resistencia. Y aunque la mayoría de ellos presenta un solo «carril», un trabajo reciente ha descubierto un compuesto capaz de transportar la corriente eléctrica en ambos sentidos a la vez.

El material, conocido como β-Bi_2Pd, consta de una fina lámina cristalina de bismuto y paladio. Cuando se le da la forma de un anillo, muestra la exótica propiedad de hacer circular la corriente en sentido horario y antihorario al mismo tiempo. Sus creadores aseguran que podría desempeñar un papel importante en la próxima generación de ordenadores cuánticos.

Semejante superposición de corrientes en ambos sentidos podría permitir que el material actuase como un qubit, la unidad básica de información en computación cuántica, explica Yufan Li, físico de la Universidad Johns Hopkins y autor principal del estudio. Mientras que un bit clásico solo puede adoptar uno de dos estados posibles (0 o 1), un qubit puede hallarse en una superposición cuántica de ambos a la vez, un estado no muy distinto del asociado al célebre gato vivo y muerto de Schrödinger. Como consecuencia, los qubits pueden emplearse para almacenar más información que los bits clásicos y, con ello, lograr una mayor potencia de cómputo.

Los qubits superconductores diseñados hasta el momento necesitan un campo magnético sumamente preciso para funcionar correctamente. Sin embargo, los anillos β-Bi_2Pd desarrollados por Li y su equipo no precisan imanes externos para que la corriente circule en ambos sentidos. Los investigadores sostienen que este atributo podría suponer una «mejora inmediata» de la tecnología cuántica existente. «En nuestro caso, el qubit funciona sin campo magnético», señala Li. «Eso conlleva una simplificación sustancial del diseño y la calibración del circuito.»

Además, es posible que las singulares cualidades del β-Bi_2Pd den lugar a cuasipartículas (excitaciones colectivas de los electrones del material) conocidas como «fermiones de Majorana». Estos estados se caracterizan por ser idénticos a sus correspondientes «antipartículas» (en el caso de un material, el estado colectivo con cargas cuánticas opuestas). Si el nuevo material presentase esta propiedad, ello abriría las puertas a diseñar un tipo de qubit —hasta ahora solo posible en teoría— muy resistente a las perturbaciones del entorno, añade Li.

No obstante, aún queda un largo camino por recorrer antes de construir qubits funcionales de cualquier tipo con anillos de β-Bi_2Pd. Javad Shabani, físico de la Universidad de Nueva York que no participó en el estudio, advierte que, entre otros aspectos, los anillos tendrían que poder controlarse mejor para dar lugar a qubits viables. «Si no logramos controlarlos, tampoco podremos usarlos realmente», concluye el experto.

—Jim Daley

PSICOLOGÍA

Dormir para hallar la solución

Reactivar durante el sueño el recuerdo de los problemas ayuda a resolverlos

Cuando uno anda enfrascado en un problema, a veces lo mejor es dejar de pensar en él, por lo menos de forma consciente. Las investigaciones han demostrado que tomarse un respiro o consultarlo con la almohada ayudan a que el cerebro encuentre el camino a una solución. Ahora un nuevo estudio ahonda en ese efecto, denominado incubación, al usar estímulos sonoros para que la mente durmiente se centre en un problema.

Cuando dormimos, algunas partes del cerebro rememoran ciertos recuerdos, cosa que los consolida y los transforma. Hace una década se creó una técnica, la reactivación selectiva de la memoria, destinada a reforzar recuerdos escogidos: cuando uno de ellos se vincula con un sonido y este se reproduce después durante el sueño, ese recuerdo se reactiva. En un estudio publicado el pasado noviembre en *Psychological Science*, se analizó si evocar el recuerdo de un acertijo durante el sueño mejoraría su resolución.

Unos 60 participantes acudieron al laboratorio antes y después de dormir una noche. En la primera sesión intentaron resolver acertijos espaciales, verbales y conceptuales, durante cada uno de los cuales escuchaban de fondo un clip musical distinto, hasta que se toparon con media docena que no podían resolver. Aquella noche portaron unos electrodos que detectaban el sueño de ondas lentas, o no REM (la fase más profunda y que puede ser importante para la consolidación de la memoria). Durante este un aparato reproducía los sonidos asignados a tres de los seis acertijos irresolutos. Al día siguiente, de vuelta al laboratorio, los participantes intentaron resolverlos de nuevo. (Cada probando repitió el experimento a la noche siguiente con una serie distinta de acertijos.) En suma, resolvieron el 32 por ciento de los acertijos estimulados por los sonidos, en contraste con el 21 por ciento de los no inducidos, lo que supone un 50 por ciento más de éxito.

Los investigadores «optaron por unas tareas que exigían mucho procesamiento complejo y, sorprendentemente, descubrieron efectos notables en todos esos problemas», afirma Penny Lewis, psicóloga de la Universidad de Cardiff, que no participó en la investigación. «Estos resultados son magníficos. Ahora necesitamos, en primer lugar, intentar entenderlos mediante su repetición; y, segundo, averiguar los procesos esenciales sobre los que se está influyendo.»

Además de aportar nuevos indicios de que el ser humano reorganiza los recuerdos en el curso del sueño, la investigación puede tener implicaciones prácticas. «Tal vez en el futuro la reactivación selectiva de la memoria durante el sueño nos ayude a resolver nuestros problemas», afirma la autora principal Kristin Sanders, quien durante el trabajo era estudiante de grado en la Universidad del Noroeste. La técnica de monitorización del sueño es cada vez más accesible, e incluso, sin artilugios, los que se enfrenten a problemas importantes pueden centrarse en ellos antes de ir a la cama.

Aun así, no será un remedio mágico; la gente tendrá que hacer sus deberes y asimilar mentalmente las partes del rompecabezas. «Con esta técnica nadie descubrirá una cura para el cáncer, si no sabe nada de la enfermedad», aclara Sanders. *—Matthew Hutson*

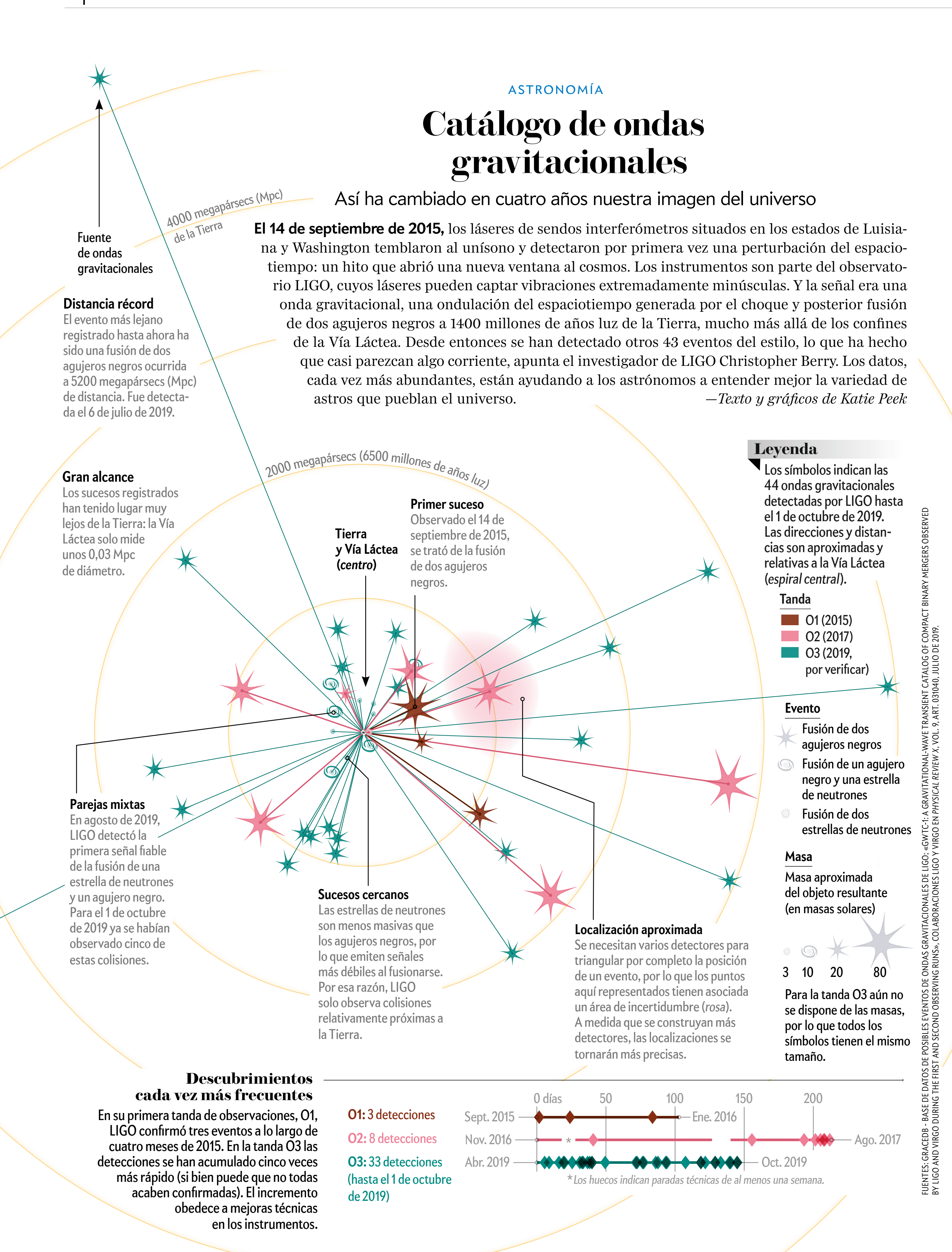
THOMAS FUCHS

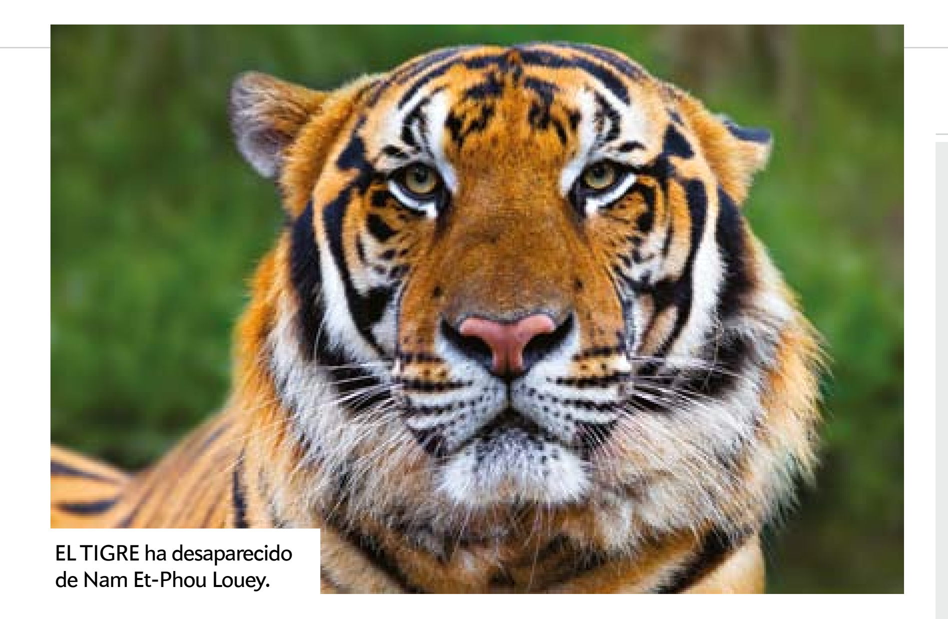
ASTRONOMÍA

Catálogo de ondas gravitacionales

Así ha cambiado en cuatro años nuestra imagen del universo

El 14 de septiembre de 2015, los láseres de sendos interferómetros situados en los estados de Luisiana y Washington temblaron al unísono y detectaron por primera vez una perturbación del espaciotiempo: un hito que abrió una nueva ventana al cosmos. Los instrumentos son parte del observatorio LIGO, cuyos láseres pueden captar vibraciones extremadamente minúsculas. Y la señal era una onda gravitacional, una ondulación del espaciotiempo generada por el choque y posterior fusión de dos agujeros negros a 1400 millones de años luz de la Tierra, mucho más allá de los confines de la Vía Láctea. Desde entonces se han detectado otros 43 eventos del estilo, lo que ha hecho que casi parezcan algo corriente, apunta el investigador de LIGO Christopher Berry. Los datos, cada vez más abundantes, están ayudando a los astrónomos a entender mejor la variedad de astros que pueblan el universo.
—Texto y gráficos de Katie Peek





EL TIGRE ha desaparecido de Nam Et-Phou Louey.

CONSERVACIÓN

El fin de los tigres de Laos

Por extenso que sea su hábitat, la especie se extinguirá si no se pone freno al furtivismo

Hace una década, los zoólogos descubrieron en una remota zona protegida del norte de Laos, Nam Et-Phou Louey, el que probablemente fuera el último reducto del tigre en aquel país. Para corroborar sus sospechas, en 2013 instalaron cámaras de fototrampeo y no tardaron en confirmar la presencia de un par de ejemplares. Pero el éxito ha sido fugaz: a lo largo de cuatro años de estudio desde entonces, no han vuelto a ver ni un solo ejemplar más.

Este hallazgo, descrito el pasado octubre en *Global Ecology and Conservation*, confirma la extinción funcional del tigre en Laos. Los investigadores han constatado asimismo que los leopardos, que supuestamente vivían aún en la reserva, también han desaparecido. «De la multitud de zonas protegidas para el tigre que existen en el sudeste asiático, esta era importante, hasta es posible que fuera una de las joyas de la corona», asegura David Macdonald, zoólogo especializado en conservación de la Universidad de Oxford. «Es terrible saber que ha sucumbido de la noche a la mañana.»

La desaparición del tigre en Laos forma parte de una dinámica alarmante que afecta al sudeste asiático; el felino ya se ha extinguido en Vietnam y Camboya. En casi todos los lugares estudiados por Macdonald y sus colaboradores, los tigres en libertad —de los que ahora quedan menos de 4000 en el mundo— están en franco declive o se han esfumado por completo. También los antaño abundantes leopardos. La pérdida del hábitat tiene parte de la culpa, pero Macdonald señala como principal responsable a «la plaga de la caza furtiva».

Akchousanh Rasphone, autora principal del estudio y primera laosiana en doctorarse en Oxford, instaló y examinó con sus colaboradores más de 1500 cámaras de fototrampeo esparcidas por los casi 6000 kilómetros cuadrados de montañas escarpadas y selva densa de Nam Et-Phou Louey. A lo largo de cuatro años han avistado 43 especies de aves y mamíferos, pero ni un solo leopardo, y desde 2013, ni un solo tigre. Importantes ONG internacionales colaboran en las campañas contra el furtivismo en las grandes zonas protegidas de Laos, pero como en tantos otros países, los cazadores consiguen burlarlas. «Este desenlace no me sorprende», afirma Ullas Karanth, zoólogo especializado en carnívoros del Centro de Estudios Faunísticos de Bangalore, que no ha participado en la investigación. «Ni la selva ni el hábitat adecuado escasean en la zona del estudio ni en el sudeste de Asia, pero sin medidas de protección contra los que practican la caza a escala industrial, la fauna desaparecerá.»

El tigre puede vivir en territorios humanizados: India es el segundo país más poblado del mundo, pero ha priorizado la conservación de este gran felino y ahora alberga dos tercios de sus efectivos en libertad. Macdonald afirma que países como Tailandia, que aún cuenta con unos 200, deben tomar ejemplo de India y Laos; la conservación del hábitat es esencial pero también lo es acabar con la corrupción, luchar contra los cazadores furtivos y reducir la demanda de partes del cuerpo de los grandes felinos. «De un modo u otro, la gente tendrá que cambiar de actitud», sentencia.

—*Rachel Nuwer*

OZBALCI, GETTY IMAGES (*tigre*); LABORATORIO DE BIOLOGÍA MARINA, UNIVERSIDAD DE SEVILLA (*Astroides calycularis*)

AGENDA

CONFERENCIAS

14 de enero
Lo que el ojo no ve
Alejandro Gómez Marín, CSIC
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es

24 de enero
¿Y tú me lo preguntas? Química eres tú
Ana Isabel Elduque Palomo, Universidad de Zaragoza
Ámbito Cultural de El Corte Inglés
Málaga
www.encuentrosconlaciencia.es

28 de enero
Océanos, hielos y fuego: Las misteriosas lunas de Júpiter
Emma Bunce, Universidad de Leicester
Museo de las Ciencias
Valencia
www.cac.es

EXPOSICIONES

Hasta el 31 de enero
Un mundo por descubrir
Universidad de Sevilla
gestioneventos.us.es



Hasta el 31 de enero
Leonardo da Vinci: Observa, cuestiona, experimenta
Avenida Francisco La Roche, Vía Litoral
Santa Cruz de Tenerife
obrasociallacaixa.org

Otra mirada a las matemáticas
Casa de las Ciencias
Logroño
www.logroño.es

OTROS

Hasta el 2 de febrero (inscripciones)
Experimenta
Feria-concurso de experimentos de física y tecnología para estudiantes de secundaria
Convoca: Universidad de Valencia
www.uv.es

REDES SOCIALES

La dinámica del discurso de odio en Internet

Un nuevo análisis revela por qué los métodos actuales para erradicar contenidos violentos en línea no funcionan y propone cuatro estrategias para combatir la intolerancia en Internet

NOEMI DERZSY



UN TRABAJO HA REVELADO que, en Internet, los grupos que promueven mensajes violentos o intolerantes se encuentran organizados en redes muy resistentes y con gran capacidad de recuperación. ¿Es posible combatir el fenómeno sin vulnerar la privacidad de los usuarios?

¿Cómo se mantiene el ecosistema de odio en las redes sociales? ¿Qué medidas pueden tomarse para reducir su presencia? En un cautivador trabajo reciente, el físico de la Universidad de Washington Neil Johnson y sus colaboradores han abordado tales cuestiones. Los autores arrojan luz sobre la estructura y la dinámica de los grupos que esparcen mensajes de odio en Internet y, a partir de ello, proponen cuatro estrategias para reducir los contenidos violentos e intolerantes en las redes sociales.

Vivimos en una era de elevada interconexión digital. Como consecuencia, las opiniones compartidas en una cierta región geográfica no permanecen localizadas en ese sitio, sino que se propagan con rapidez por todo el mundo gracias a las redes sociales. Esa alta velocidad de difusión facilita que quienes propugnan un discurso de odio divulguen sus mensajes y recluten adeptos en todo el mundo. Y si la supervisión de las redes sociales no basta para frenar el fenómeno, el ecosistema digital resultante puede convertirse en un poderoso instrumento de radicalización. Por tanto, entender los mecanismos que gobiernan la dinámica de tales comunidades se antoja clave a la hora de proponer medidas eficaces para combatirlas.

En su trabajo, Johnson y sus colaboradores examinaron la dinámica de los grupos de odio en dos plataformas, Facebook y VKontakte (una popular red social rusa), durante varios meses. Las redes objeto de análisis se definieron como páginas o grupos virtuales que congregaban a individuos con puntos de vista, intereses y propósitos declarados parecidos. Tales agrupaciones incluyen enlaces a otras con contenidos similares, de manera que los usuarios de una de ellas pueden unirse también a las demás. A través de estos vínculos, los autores cartografiaron las conexiones entre redes e indagaron de qué forma los miembros de una red acababan integrándose en otras. Dos redes se consideraban conectadas si se enlazaban mutuamente. Además, el análisis de los investigadores presentaba la ventaja de que no requería información personal de los usuarios.

Redes resistentes

El estudio ha revelado que, en Internet, los grupos que promueven mensajes violentos o intolerantes se encuentran organizados en redes muy resistentes y con gran capacidad de recuperación. Los usuarios no se sitúan en una localización geográfica específica, sino que se interconectan a escala mundial mediante «autopistas» que facilitan la propagación de su

discurso en diferentes países, continentes e idiomas.

Si dichas redes sufren un ataque (como ocurre cuando, por ejemplo, los administradores de la red social eliminan un grupo), rápidamente se reconectan y se autorreparan. Y gracias a los usuarios que comparten, aparecen fuertes vínculos entre ellas que los autores comparan a enlaces químicos covalentes. En algunos casos, dos o más redes pequeñas pueden unirse para dar lugar a otra mayor, un proceso que los investigadores asemejan a la fusión de núcleos atómicos. A partir de un modelo matemático, el trabajo ha llegado a la conclusión de que vedar contenidos violentos o intolerantes en una sola red social exacerba el ecosistema de odio y promueve la creación de nuevas redes que la vigilancia de la plataforma ya no puede detectar y donde los mensajes de odio crecen sin control.

Las redes sociales se han mostrado extremadamente difíciles de regular, lo que ha impedido promulgar medidas prácticas que reduzcan la violencia y la intolerancia digital. Los intentos para prohibir y eliminar contenidos que incitan al odio no han dado frutos. Y en los últimos años el número de denuncias contra discursos de odio en Internet no ha dejado de crecer, lo que indica que la batalla en ese frente se está perdiendo. Además, se ha sugerido que la exposición a mensajes intolerantes en redes sociales acaba promoviendo la radicalización y las agresiones en el mundo real, al comprobarse que algunos perpetradores de crímenes de odio habían estado expuestos previamente a ese tipo de contenido en línea.

Los trabajos que hasta ahora habían analizado el problema, o bien consideraban los grupos de odio como redes individuales, o bien trataban las redes interconectadas como una única red global. La novedad del estudio de Johnson y sus colaboradores radica precisamente en haber examinado la estructura entrelazada de estos grupos como una «red de redes», o redes interconectadas mediante autopistas. A partir de ahí, proponen cuatro estrategias para combatir la proliferación del discurso de odio.

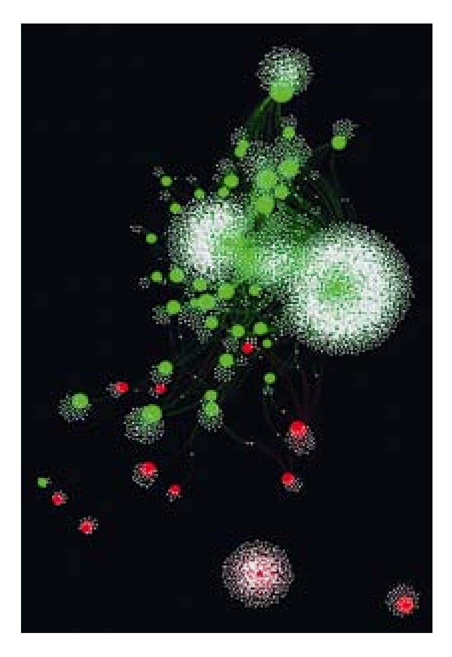
Nuevas estrategias

Hoy, los administradores de una red social han de decidir qué tipo de contenidos prohibir, lo que exige lidiar con una abrumadora cantidad de datos, así como con las distintas normativas de cada país. Las estrategias propuestas en el nuevo trabajo tienen en cuenta las consideraciones legales relacionadas con la expulsión de grupos y usuarios individuales. Pero, sobre todo, cada una de ellas podría ponerse en práctica sin necesidad de que las distintas plataformas compartieran información entre sí, algo prohibido en la mayoría de los casos a menos que el usuario otorgue su consentimiento explícito.

Como primera medida, los autores proponen suprimir las redes de odio relativamente pequeñas, en lugar de eliminar la mayor de ellas. Esta estrategia se apoya en el hallazgo de que la distribución de tamaños de estos grupos sigue una ley de potencias, de modo que hay muchas redes pequeñas y solo unas pocas grandes. Por tanto, es de prever que la erradicación de un grupo de gran tamaño conduzca a la formación de otro similar a partir de una multitud de redes menores. En cambio, las redes pequeñas abundan, lo que significa que son relativamente fáciles de localizar, al tiempo que eliminarlas prevendría la aparición de otras mayores.

Sin embargo, prohibir grupos enteros de usuarios (con independencia de su dimensión) puede generar indignación y acusaciones de que la plataforma vulnera la libertad de expresión. Para evitarlo, la segunda estrategia propone expulsar a un número reducido de usuarios elegidos al azar entre las distintas redes de odio. Al ser aleatorio, este método no requiere que los objetivos se encuentren bien localizados espacialmente ni tampoco exige usar información privada del usuario (la cual no puede emplearse para actuar contra individuos concretos), lo que evita cualquier violación de las normas de privacidad. No obstante, su eficacia dependerá en gran medida de la estructura de la red social, ya que las características topológicas de una red determinan fuertemente su resistencia frente a fallos aleatorios y ataques dirigidos [*véase* «Redes sin escala», por Albert-László Barabási y Eric Bonabeau; Investigación y Ciencia, julio de 2003].

La tercera medida propuesta por los autores se basa en el hallazgo de que estos grupos se organizan a partir de un conjunto inicialmente desordenado de individuos. Aboga por que los administradores de la plataforma promuevan la creación de grupos antiodio, los cuales funcionarían como una especie de «sistema inmunitario» para contrarrestar a los grupos que promueven la intolerancia.



LA MANERA en que se autoorganizan los grupos violentos en Internet sigue determinadas pautas comunes. Este esquema muestra los cambios (*blanco*) observados en las redes afines al Ku Klux Klan en la red social VKontakte (*verde, grupos ya conectados; rojo, grupos aislados del resto*) durante los días posteriores a la masacre en el instituto Stoneman Douglas de Parkland, en Florida, ocurrida el 14 de febrero de 2018. La circulación de noticias sobre la posible ideología racista del presunto autor de la matanza provocó el nacimiento de un fuerte vínculo entre los dos nodos de mayor tamaño. La misma dinámica se ha observado en otros casos, como las redes yihadistas antioccidentales.

DE: «HIDDEN RESILIENCE AND ADAPTIVE DYNAMICS OF THE GLOBAL ONLINE HATE ECOLOGY»; NEIL F. JOHNSON ET AL. EN *NATURE*, VOL. 573, PÁGS. 261-265, AGOSTO DE 2019.

Por último, la cuarta estrategia explota el hecho de que en Internet coexisten muchos grupos de odio que defienden posiciones contrarias. Sugiere que los administradores introduzcan un grupo artificial de usuarios para fomentar la interacción entre redes con puntos de vista opuestos y causar el enfrentamiento entre ellas. El modelo de los autores ha demostrado que tales batallas erradicarían con eficacia agrupaciones de gran tamaño. Una vez puestas en práctica, la tercera y la cuarta estrategia requerirían poca intervención directa por parte de los administradores de la plataforma. Sin embargo, poner a unos grupos en contra de otros exigiría una meticulosa obra de ingeniería.

Un problema complejo

Los autores recomiendan precaución a la hora de evaluar las ventajas e inconvenientes que conllevaría adoptar cada una de las estrategias, ya que la viabilidad de cada una de ellas dependerá de los recursos computacionales y humanos disponibles, así como de las normas de privacidad. Además, toda decisión sobre qué medida llevar a cabo debería basarse en análisis empíricos y en los datos relativos a cada uno de estos grupos.

A lo largo de los años, ha quedado claro que las soluciones para lidiar con el odio en línea y los problemas legales y de privacidad de las redes sociales no pueden provenir solo de segmentos concretos de la industria. Es necesario un esfuerzo combinado de las compañías tecnológicas, de los legisladores y también de los investigadores. El estudio de Johnson y su grupo proporciona valiosa información al respecto y las estrategias propuestas pueden constituir una valiosa guía de cara a intentos futuros.

Noemi Derzsy *investiga en el Grupo de Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos de los Laboratorios AT&T, en Nueva York.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 573, págs. 203-204, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Quantifying social group evolution. Gergely Palla, Albert-László Barabási y Tamás Vicsek en *Nature*, vol. 446, págs. 664–667, abril de 2007.

Spread of hate speech in online social media. Binny Mathew et al. en *Proceedings of the 10th ACM Conference on Web Science*, págs. 173-182. ACM, julio de 2019.

Hidden resilience and adaptive dynamics of the global online hate ecology. Neil F. Johnson et al. en *Nature*, vol. 573, págs. 261–265, agosto de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

La era de la (des)información. Walter Quattrociocchi en *IyC*, octubre de 2016.

La resiliencia de la Red Oscura. Alex Arenas en *IyC*, marzo de 2018.

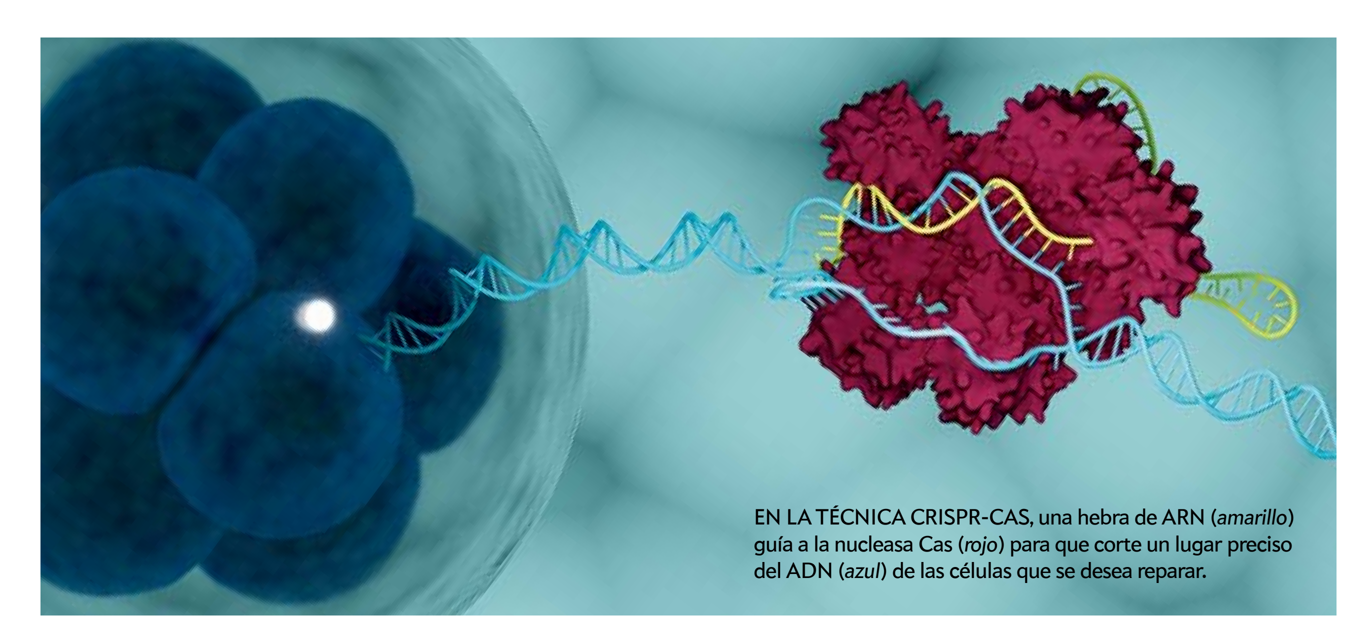
Caos en las redes sociales. Claire Wardle en *IyC*, noviembre de 2019.

GENÉTICA

La aplicación de CRISPR en humanos

La popular técnica de edición genética está transformando el modo en que nos enfrentamos a las enfermedades

MARC GÜELL



EN LA TÉCNICA CRISPR-CAS, una hebra de ARN (*amarillo*) guía a la nucleasa Cas (*rojo*) para que corte un lugar preciso del ADN (*azul*) de las células que se desea reparar.

En las dos últimas décadas hemos visto una aceleración sin precedentes de la biotecnología. Para incrementar nuestra capacidad de hacer ingeniería de las cosas vivas ha sido clave aprender a leer y escribir en el lenguaje de la vida. Uno de los avances más revolucionarios ha sido el desarrollo de las nucleasas programables, una suerte de tijeras moleculares que nos permiten modificar, o editar, sitios muy concretos del genoma. Entre ellas ha destacado la técnica CRISPR-Cas, gracias a su facilidad de uso, eficacia y bajo coste. La posibilidad de aplicarla para modificar el genoma humano ha supuesto un avance fundamental; un avance en el que tuve la suerte de participar.

CRISPR: un antes y un después

Recuerdo muy bien ese momento. En 2012, cuando me hallaba en mi segundo año de posdoctorado en la Escuela de Medicina de Harvard, en Boston, un compañero de laboratorio, Prashant Mali, nos hablaba de unos resultados que iban a cambiar la historia de las biociencias. Con una mezcla de incredulidad y excitación, nos explicaba cómo había conseguido modificar una línea celular humana con un extraño sistema inmunitario de las bacterias llamado CRISPR [*véase* «El descubrimiento del sistema CRISPR-Cas», por

Francisco J. M. Mojica y Cristóbal Almendros; Investigación y Ciencia, octubre de 2017]. Había adaptado este sistema para crear una herramienta de edición genética en células de mamífero. Se inspiró en un artículo pionero de Jennifer Doudna, de la Universidad de California en Berkeley, y Emmanuelle Charpentier, actualmente en la Facultad de Medicina de Hannover, en el que habían demostrado que CRISPR podía usarse para cortar el ADN de las células, tanto de forma directa en el laboratorio como, de manera programada, fuera de él.

Mali nos preguntó a mí y a otros colaboradores si podíamos ayudarle a validar los resultados, una invitación que acepté con gran entusiasmo. En efecto, comprobamos que CRISPR simplificaba muchísimo nuestra capacidad de «reescribir» el genoma. En pocos meses, en 2013, publicamos los resultados en un artículo de la revista *Science*. En él demostrábamos por primera vez la posibilidad de utilizar CRISPR en las células humanas: no solo se podía editar el genoma de distintas líneas celulares, sino también de células madre pluripotentes inducidas (células somáticas que se manipulan para que regresen al estado indiferenciado y puedan dar lugar a cualquier otro tipo de célula).

El trabajo tuvo un gran impacto, sobre todo en el ámbito de la biomedicina, porque hacía mucho más fácil la modificación del genoma humano. Desde entonces, la aplicación de CRISPR se ha vuelto muy popular y se ha utilizado para múltiples propósitos, en especial para estudiar y combatir enfermedades como el cáncer o la anemia falciforme.

También se ha empleado para codificar en el genoma la resistencia al sida, en el desafortunado caso de las niñas Lulu y Nana que convulsionó el mundo en noviembre de 2018. Sus embriones fueron modificados con CRISPR por He Juiankui, exprofesor de la Universidad de Ciencia y Tecnología del Sur, en Shenzhen, con ánimo de editar el receptor CCR5 para impedir que el VIH se introdujera en las células en una eventual infección. Aparte de las cuestiones éticas que suscita la modificación genética de embriones humanos, la fiabilidad de la técnica no es total y puede acarrear efectos negativos imprevisibles a largo plazo; además, deben tenerse en cuenta las posibles repercusiones en las futuras generaciones, ya que los cambios se transmitirán a la descendencia.

Hacia un mundo sin listas de espera

Quizá la aplicación más fascinante de la técnica CRISPR en humanos es la posibilidad de crear una fuente ilimitada de tejidos y órganos en cerdos que puedan ser trasplantados después a humanos. La escasez de órganos es probablemente el problema médico más grave que existe. En EE.UU. cada día mueren 20 de las numerosas personas que están esperando un trasplante. No se prevé que la disponibilidad de órganos vaya a incrementarse de manera sustancial. Aunque la impresión en 3D en el campo de la bioingeniería avanza rápidamente y se ha logrado producir tejidos como cartílago o válvulas cardíacas, la generación de órganos vascularizados grandes, como un riñón o un corazón, parece estar todavía lejos. Por consiguiente, resulta imprescindible buscar soluciones imaginativas.

El aprovechamiento de órganos de cerdos debe superar dos dificultades principales: aumentar la compatibilidad entre el órgano porcino y el organismo humano y eliminar los virus endógenos de los cerdos. A pesar de que el cerdo y el humano tienen un tamaño y una fisiología parecidos, los separan 96 millones de años de evolución. Para obtener órganos que no sean rechazados por el sistema inmunitario humano se necesita de algún modo «humanizar» antes a los cerdos. La estrategia consiste, por un lado, en introducir en el cerdo ciertos genes humanos, y por otro, en eliminar de él algunos propiamente porcinos, ajenos a los humanos. Estos pasos se realizan en el laboratorio mediante técnicas de transgénesis en la fase embrionaria. El progreso ha sido vertiginoso y en la actualidad se cuenta con riñones y corazones de cerdos «humanizados» que mantienen con vida a primates durante meses e incluso años. Es probable que en los próximos años veamos los primeros ensayos clínicos de órganos de cerdos «humanizados» trasplantados a personas. [*Véase* «Órganos humanos fabricados dentro de animales», por J. Carlos Izpisúa; Investigación y Ciencia, enero de 2017.]

Pero para ello deberá solucionarse también un obstáculo importante: los retrovirus endógenos porcinos (PERV, por sus siglas en inglés). Dentro del genoma del cerdo residen varias copias de estos virus, por lo que los órganos trasplantados podrían llegar a infectar a los humanos. Aunque hay cierto desconocimiento sobre los efectos negativos de estos virus, se sabe que se transmiten de las células porcinas a las humanas, especialmente algunos subtipos de virus. La Organización Mundial de la Salud ha emitido varios documentos para advertir del riesgo de infección por PERV. Aquí, otra vez, la técnica CRISPR ha sido clave para eliminarlos al permitir introducir 25 modificaciones genéticas simultáneas.

Tal fue el propósito de un equipo formado por la empresa *eGenesis*, Harvard e investigadores de universidades chinas, equipo del que formé parte y lideré en fases importantes del proyecto. Publicamos los resultados en *Science*, en dos artículos que aparecieron, respectivamente, en 2015 y 2017. Ese último año nacieron los primeros cerdos sin PERV. Pocos se preguntan ahora si dispondremos algún día de órganos de cerdos para que puedan ser trasplantados a humanos. Solo falta saber cuándo.

A pesar de los avances tan excitantes logrados, todavía tenemos mucho trabajo por delante. Sigue siendo difícil hacer grandes modificaciones en el genoma humano, que a veces son necesarias para ciertos fines terapéuticos. Además, todavía deben caracterizarse bien los márgenes de seguridad de estas técnicas. En nuestro laboratorio de la Universidad Pompeu Fabra estamos centrados en crear nuevas estrategias que combinen eficacia y seguridad para poder ayudar a un porcentaje más grande de pacientes.

Marc Güell *es profesor de la Universidad Pompeu Fabra e investigador principal del Grupo de Biología Sintética Traslacional.*

PARA SABER MÁS

RNA-guided human genome engineering via Cas9. Prashant Mali et al. en *Science*, vol. 339, n.° 6121, págs. 823–826, febrero de 2013.
Genome-wide inactivation of porcine endogenous retroviruses (PERVs). Luhan Yang et al. en *Science*, vol. 350, n.° 6264, págs. 1101-1104, noviembre de 2015.
Inactivation of porcine endogenous retrovirus in pigs using CRISPR-Cas9. D. Niu et al. en *Science*, vol. 357, n.° 6357, págs. 1303-1307, septiembre de 2017.
PERV inactivation is necessary to guarantee absence of pig-to-patient PERVs transmission in xenotransplantation. Marc Güell et al. en *Xenotransplantation*, vol. 24, n.° 6, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Modificar nuestra herencia. Stephen S. Hall en *IyC*, noviembre de 2016.
Edición genética de embriones humanos. Nerges Winblad y Fredrik Lanner en *IyC*, octubre de 2017.

ECOLOGÍA

Mapa mundial de los nematodos del suelo

La gran diversidad de estos minúsculos gusanos pone de relieve su importante papel en los ecosistemas y en el ciclo global del carbono

NICO EISENHAUER Y CARLOS A. GUERRA



LOS NEMATODOS constituyen la mayor proporción de la fauna del suelo y son un componente esencial de los ecosistemas terrestres.

GETTY IMAGES/NNEHRING/ISTOCK

El cambio climático está alterando la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas del planeta. Los organismos del suelo constituyen un componente básico de la biodiversidad terrestre y contribuyen al bienestar de la humanidad con sus aportaciones en ámbitos como la seguridad alimentaria, la depuración del agua y el almacenamiento del carbono.

Sin embargo, no se sabe bien cómo se verá afectada la biodiversidad edáfica como consecuencia de la intensificación de la actividad agrícola, las alteraciones del clima y los cambios en el uso del suelo. Esto supone un motivo de alarma, dadas las grandes lagunas que existen en nuestro conocimiento de la distribución mundial de este tipo de biodiversidad. Ya hay disponibles bases de datos mundiales sobre las bacterias y los hongos del suelo, creadas por medio del análisis del ADN, pero hasta la fecha no se había emprendido ningún examen cuantitativo de la fauna edáfica a escala planetaria. Ahora, un equipo internacional de investigadores dirigido por el laboratorio de Thomas W. Crowther, de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, viene a llenar ese vacío con la presentación del conjunto de datos más exhaustivo del que se tenga noticia sobre los nematodos que habitan en ese medio. Los resultados del estudio se publicaron en julio en *Nature*.

Los nematodos son vermes diminutos, con una longitud máxima de 10 milímetros y cuerpo traslúcido, que pululan en las películas de agua del suelo. Por su gran abundancia, constituyen un sujeto de estudio útil de la biodiversidad edáfica, pues llegan a superar el millón de individuos por metro cuadrado de suelo. Representan en torno al 80 por ciento de los animales pluricelulares del planeta, con importantes funciones en multitud de ecosistemas. Algunos son nocivos, causantes de plagas que provocan cuantiosas pérdidas en los cultivos de todo el mundo. Otros, en cambio, potencian el crecimiento vegetal al fomentar la recirculación de los nutrientes.

Más nematodos a mayor latitud

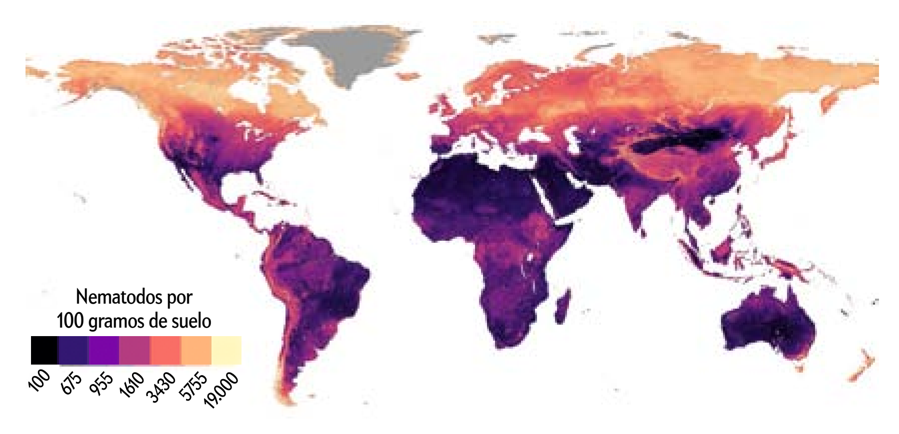
Crowther y sus colaboradores han compilado datos de 6759 muestras tomadas de la capa superior del suelo en diversos ecosistemas de todos los continentes. Analizaron esos datos para determinar el número y los tipos de nematodos presentes (por medio de la microscopía, estos agrupamientos se hicieron en virtud del tipo de alimento de cada especie en particular, como plantas u hongos). Las comunidades de nematodos edáficos varían mucho en escalas espaciales reducidas, lo que dificulta el cálculo de su población mundial a partir de las observaciones de un lugar. Con el fin de solventar este problema, los autores recurrieron al aprendizaje automático para analizar tanto datos publicados como inéditos, predecir con ellos los patrones de distribución global de estos vermes y, a partir de ahí, trazar mapas mundiales de la abundancia de sus especies y de su biomasa. Los autores calculan que en la capa superior del suelo del planeta habitan $4,4 \times 10^{20}$ nematodos, una cifra descomunal, equiparable en magnitud a la cantidad de estrellas que se estima existen en el universo observable.

La biodiversidad de los vertebrados, los invertebrados y los vegetales disminuye a medida que nos alejamos del ecuador y nos acercamos a los polos, un fenómeno cuyas posibles causas se han debatido con anterioridad [*véase* «¿Por qué la biodiversidad es máxima cerca del ecuador?», por Gary G. Mittelbach; INVESTIGACIÓN Y CIEN-

cia, febrero de 2018]. Por contra, el equipo de Crowther afirma haber observado la tónica inversa en los nematodos: su mayor abundancia y biomasa (indicadores de la biodiversidad) se han registrado en las regiones donde se extienden los bosques boreales (territorios nevados, dominados por las coníferas) y la tundra (llanuras frías desprovistas de vegetación arbórea). Este descubrimiento pone en entredicho la arraigada idea sobre la distribución mundial de la diversidad animal. Los nuevos datos indican que la tendencia de la fauna del suelo recuerda más a la de los microbios que habitan en ese mismo medio.

En el trabajo se presentan asimismo cálculos globales de la cantidad de carbono que almacenan los cuerpos de los nematodos, así como de su actividad metabólica. Los resultados indican que su metabolismo emite el equivalente al 15 por ciento de las emisiones de carbono producidas por los combustibles fósiles. Tal hallazgo tiene importantes repercusiones en nuestra comprensión del ciclo global del carbono. También entraña posibles realimentaciones que influirían en el cambio climático, ya que hasta el momento la fauna edáfica no se ha contemplado en los modelos de este elemento.

Los datos presentados apuntan a que los nematodos abundan en partes del planeta que se prevé que sufrirán alteraciones notables a causa del cambio climático, como las regiones boreales y la tundra. Los autores destacan las amenazas que se ciernen sobre estos organismos y los procesos en los que influyen. El calentamiento del clima podría provocar un descenso de su abundancia, lo cual tendría efectos desconocidos en los gases de efecto invernadero que el suelo desprende, aparte de otros procesos ecosistémicos, como la infección de las plantas por plagas. Será esencial indagar en los factores que afectan a otros miembros de la fauna edáfica, como las hormigas y las lombrices de tierra, que modulan el ambiente para los seres más diminutos, como los nematodos, entre otros. Abordar esta cuestión exigirá un proceso de muestreo y de seguimiento global y metódico en el tiempo.



LA DENSIDAD DE NEMATODOS aumenta del ecuador hacia los polos, como también la diversidad de sus especies. Tal tendencia es opuesta a la de la mayoría de los seres vivos del planeta, cuya diversidad disminuye al aumentar la latitud.

FUENTE: «SOIL NEMATODE ABUNDANCE AND FUNCTIONAL GROUP COMPOSITION AT A GLOBAL SCALE», POR JOHAN VAN DEN HOOGEN ET AL. EN *NATURE*, VOL. 572, PÁGS. 194-198, JULIO DE 2019. © *NATURE*

Datos para la conservación

Si bien este y otros estudios actuales arrojan luz sobre el estado, los procesos y las funciones de la biodiversidad edáfica, es posible que tales datos no diluciden las consecuencias de los cambios globales presentes y futuros. Así pues, aparte de dibujar mapas mundiales de esa biodiversidad, será esencial conocer los efectos directos e indirectos que los factores responsables del cambio climático tendrán en el futuro sobre las comunidades y los ecosistemas del suelo. De igual modo, también será importante saber si esos efectos variarán en los distintos tipos de ecosistemas, según las condiciones del suelo y la gestión que de él haga nuestra especie. La mejora en el conocimiento de la biodiversidad edáfica aportaría a los investigadores y a los planificadores datos necesarios para determinar el grado de vulnerabilidad de la fauna de ese medio, lo cual redundaría en estrategias de conservación eficaces.

Los adelantos de las últimas décadas han traído consigo modelos informáticos de predicción que permiten tomar mejores decisiones en la gestión. Numerosos documentos estratégicos y de política ya incluyen alguno de tales modelos para emitir pronósticos sobre cuestiones ecológicas, ambientales, sociales y económicas. Pero en la mayoría de las proyecciones a gran escala en el campo de la ecología o de la sostenibilidad, los suelos y las comunidades de seres vivos que habitan en él brillan por su ausencia. Un ejemplo: la Plataforma Intergubernamental sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas, un organismo de las Naciones Unidas, redactó un informe global sobre las amenazas y las tendencias de la biodiversidad en cuya reseña general no aparecen ni una sola vez los organismos edáficos, con contadas menciones dispersas en el cuerpo del documento. No cabe duda de que sería valioso disponer de más información referente a la dinámica esperada de la biodiversidad edáfica en las situaciones hipotéticas que se barajan ante el cambio global.

En el contexto de los esfuerzos internacionales para afrontar el cambio climático, como el Acuerdo de París, y ante el fracaso en la consecución de los objetivos marcados hacia 2020 para la biodiversidad (los denominados objetivos de Aichi), el hecho de que uno de los grandes componentes de la diversidad terrestre esté ausente del discurso científico y político seguramente solo contribuirá al deterioro de los ecosistemas. Este problema resulta más acuciante, si cabe, a la vista de iniciativas como la que persigue la restauración de los bosques del mundo, que podrían desatar cambios importantes en las comunidades de nematodos del hemisferio norte. El trabajo de Crowther constituye un paso en la dirección correcta que era necesario con urgencia, pues aporta una base sobre la cual elaborar un conocimiento más profundo de cómo serán los ecosistemas terrestres en el futuro.

Nico Eisenhauer** y **Carlos A. Guerra
desempeñan su actividad profesional en el Centro Alemán de Investigación Integrativa en Biodiversidad de Halle-Jena-Leipzig, en Leipzig.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 572, págs. 187-188, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. Johan van den Hoogen et al. en *Nature*, vol. 572, págs. 194-198, julio de 2019.

Global mismatches in aboveground and belowground biodiversity. Erin K. Cameron et al. en *Conservation Biology*, vol. 33, n.º 5, págs. 1187-1192, octubre de 2019.

FÍSICA

CRISTALES EN EL TIEMPO

Los cristales temporales son un nuevo y sorprendente estado de la materia que presenta la misma simetría que los cristales ordinarios, pero en el tiempo en vez de en el espacio

Frank Wilczek

Ilustración de Mark Ross Studio



Frank Wilczek es físico teórico en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. En 2004 recibió el premio Nobel de física por su trabajo en la teoría de la interacción fuerte y en 2012 propuso el concepto de los cristales temporales.



LOS CRISTALES son las sustancias más ordenadas de la naturaleza. Sus átomos y moléculas se disponen en estructuras regulares que se repiten para dar lugar a sólidos estables y rígidos. Y también hermosos.

Estos materiales ya resultaban fascinantes y atractivos antes del nacimiento de la ciencia moderna y a menudo han sido apreciados como joyas. El afán de los científicos del siglo XIX por clasificarlos y comprender sus efectos sobre la luz trajo consigo importantes progresos en matemáticas y física. En el siglo XX, el estudio de la teoría cuántica que describe el comportamiento de los electrones en los cristales condujo a la electrónica basada en semiconductores y, en última instancia, a los teléfonos inteligentes e Internet.

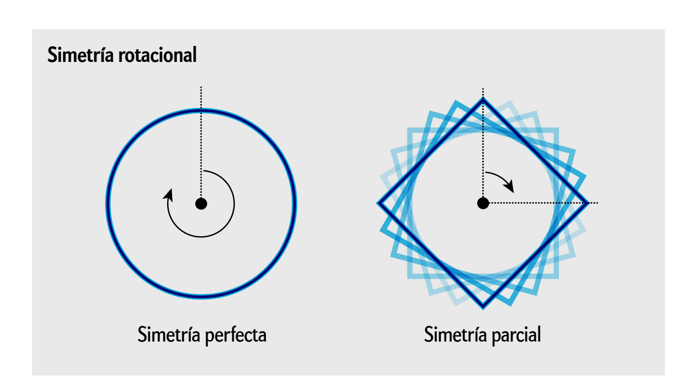
El siguiente paso en nuestra comprensión de los cristales está teniendo lugar ahora, gracias a uno de los principios que se derivan de la teoría de la relatividad de Albert Einstein: el espacio y el tiempo están íntimamente conectados y se encuentran al mismo nivel. Por ello, resulta natural preguntarse si existen objetos que presenten propiedades análogas a las de los cristales ordinarios, pero en el tiempo en vez de en el espacio. Al explorar esta cuestión, descubrimos los «cristales temporales». Este nuevo concepto, junto con la clase creciente de materiales que engloba, ha conducido a fascinantes ideas físicas y podría servir para desarrollar relojes más precisos que los actuales, entre otras aplicaciones.

SIMETRÍA

Pero antes de nada, debemos aclarar qué es exactamente un cristal. La respuesta más útil a efectos científicos se apoya en dos conceptos profundos: la simetría y su ruptura espontánea.

En el lenguaje común, el término «simetría» se asocia con el equilibrio, la armonía o incluso la justicia. En física y matemáticas, su significado es más preciso: un objeto es simétrico o posee simetría si existe una transformación que, pudiendo cambiarlo, no lo hace.

Esta definición puede parecer extraña y abstracta, así que lo mejor es poner un ejemplo. Consideremos un círculo. Cuando lo rotamos un ángulo cualquiera alrededor de su centro, su aspecto no cambia, a pesar de que se hayan movido todos sus puntos: tiene una simetría rotacional perfecta. Un cuadrado también tiene cierta simetría, pero menos que un círculo, ya que no recobra su apariencia hasta que lo rotamos 90 grados. Estos ejemplos muestran que el concepto matemático de simetría recoge un aspecto esencial de su significado habitual, al tiempo que añade la virtud de la precisión.



Una segunda ventaja de este concepto de simetría es que podemos generalizarlo de modo que se refiera no solo a las formas geométricas, sino también a las leyes físicas. Decimos que una ley tiene simetría si podemos cambiar el contexto en el que se aplica sin modificar la propia ley. Por ejemplo, el principal axioma de la relatividad especial es que las leyes de la física son las mismas cuando observamos el mundo desde distintas

EN SÍNTESIS

Los cristales corresponden a un estado ordenado de la materia donde la disposición de los átomos se repite con un cierto patrón. En la jerga de los físicos, se dice que presentan una «ruptura espontánea de la simetría bajo traslaciones espaciales».

Los cristales temporales, un nuevo concepto propuesto en 2012, son un estado de la materia cuyos patrones se repiten en el tiempo en vez de en el espacio. Estos sistemas muestran una ruptura espontánea de la simetría bajo traslaciones temporales.

En 2017 se descubrieron los primeros materiales nuevos que se ajustan completamente a la noción de cristal temporal. Esos materiales y otros encontrados desde entonces ofrecen la posibilidad de crear relojes aún más precisos que los actuales.

ILUSTRACIONES DE JEN CHRISTIANSEN

plataformas que se mueven entre sí a velocidad constante. Por lo tanto, la relatividad requiere que las leyes de la física presenten simetría frente a las transformaciones que cambian la plataforma.

Para los cristales, incluidos los temporales, resultan relevantes otra clase de transformaciones, muy sencillas pero de enorme importancia: las traslaciones. Mientras que la relatividad postula que las leyes no cambian para observadores en distintas plataformas móviles, la simetría bajo traslaciones espaciales establece que tampoco lo hacen para observadores que se encuentran en distintos lugares. Si trasladamos nuestro laboratorio de un sitio a otro, en la nueva ubicación seguirán siendo válidas las mismas leyes. En otras palabras, la simetría bajo traslaciones espaciales implica que las leyes que descubrimos en un lugar determinado se cumplen en cualquier otro.

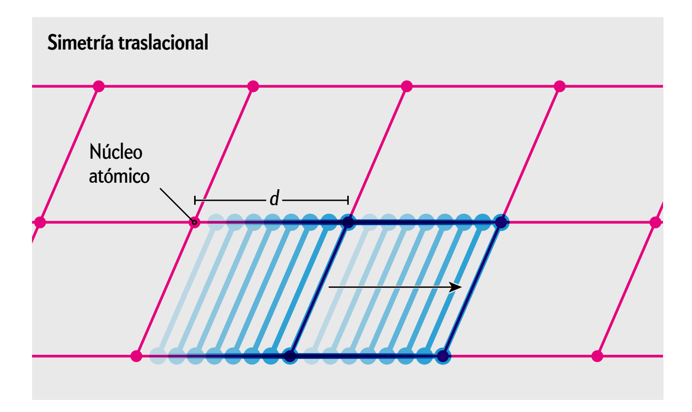
La simetría bajo traslaciones temporales expresa una idea similar, pero referida al tiempo en vez de al espacio. Afirma que las leyes que rigen hoy en día también son válidas para los observadores del pasado y del futuro. Dicho de otra forma, las leyes que descubrimos en un momento determinado se cumplen en cualquier otro. La simetría bajo traslaciones temporales es tan importante que merece un nombre menos intimidatorio, con menos de catorce sílabas, así que la denotaré por la letra griega tau (τ).

Si no existieran las simetrías bajo traslaciones espaciales y temporales, los experimentos realizados en distintos lugares y momentos no serían reproducibles. La ciencia tal y como la conocemos no sería posible sin estas simetrías, y los científicos las dan por supuestas en su trabajo diario. Pero es importante subrayar que se pueden comprobar empíricamente. Una manera de hacerlo es observar el comportamiento de los objetos astrofísicos distantes. Estos se encuentran en otros lugares y, debido a la velocidad finita con que se propaga la luz, los vemos tal y como eran en el pasado. Los astrónomos han determinado con gran precisión que esos objetos obedecen las mismas leyes que conocemos aquí y ahora.

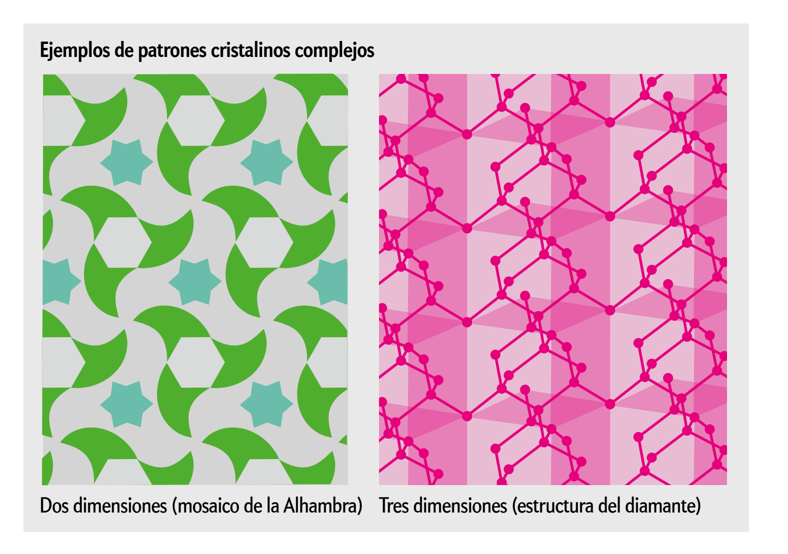
RUPTURA DE SIMETRÍA

Pese a su gran simetría estética, la característica definitoria de los cristales para un físico es la manera en que *carecen* de simetría.

Consideremos una idealización drástica: un cristal unidimensional cuyos átomos se distribuyen a intervalos regulares a lo largo de una línea, separados por una distancia d. (Por lo tanto, sus coordenadas serán nd, donde n es un número entero.) Si movemos este cristal un poco a la derecha, ya no tendrá el mismo aspecto, salvo que la magnitud del desplazamiento coincida con la distancia d o con un múltiplo entero de ella. Eso indica que nuestro cristal idealizado tiene un grado reducido de simetría bajo traslaciones espaciales, del mismo modo que un cuadrado posee menos simetría rotacional que un círculo.



En verano de 2011 estaba preparando unas clases sobre este elegante capítulo de las matemáticas como parte de un curso sobre los usos de la simetría en física. Siempre procuro mirar con nuevos ojos el material que voy a enseñar e intento añadir algo nuevo. En aquella ocasión, se me ocurrió que sería posible extender la clasificación de los patrones cristalinos tridimensionales a un espaciotiempo de cuatro dimensiones.



Cuando le mencioné esta línea de investigación matemática a mi antiguo estudiante de doctorado Alfred Shapere, ahora en la Universidad de Kentucky, me instó a considerar dos preguntas físicas muy básicas que me embarcaron en una fascinante aventura científica:

¿Qué sistemas del mundo real podrían describir los cristales espaciotemporales?

¿Podrían esos patrones llevarnos a identificar nuevos estados de la materia?

La primera pregunta es bastante fácil de responder: mientras que los cristales ordinarios son disposiciones ordenadas de objetos en el espacio, los cristales espaciotemporales son disposiciones ordenadas de eventos en el espaciotiempo.

Igual que con los cristales espaciales, podemos hacernos una idea considerando el caso unidimensional, en el que los cristales espaciotemporales se reducen a cristales puramente temporales. Buscamos, pues, sistemas cuyo estado global se repita a intervalos periódicos. Y no hace falta buscar mucho: la Tierra, por ejemplo, adopta la misma orientación espacial cada 24 horas y el sistema formado por la Tierra y el Sol repite su disposición al cabo de un año.

Durante décadas, científicos e inventores han desarrollado relojes cada vez más precisos a partir de sistemas que repiten su configuración a intervalos regulares. Los relojes de péndulo y de cuerda fueron remplazados por otros basados en las vibraciones de los cristales (tradicionales), que a su vez han sido desbancados por los relojes que emplean las vibraciones atómicas. Los relojes atómicos alcanzan precisiones extraordinarias, pero hay buenos motivos para seguir mejorándolos.

Y los cristales temporales podrían resultar de ayuda, como veremos enseguida.

Algunos sistemas del mundo real también exhiben patrones propios de los cristales espaciotemporales de más dimensiones. Por ejemplo, el patrón de la figura que aparece bajo estas líneas puede representar una onda sonora plana, donde la altura de la superficie indica la compresión del aire en función de la posición y el tiempo. Seguramente no resulte fácil dar con cristales espaciotemporales más complicados en la naturaleza, aunque podría ser un reto interesante para ingenieros y artistas (imaginemos una espectacular versión dinámica de la Alhambra).

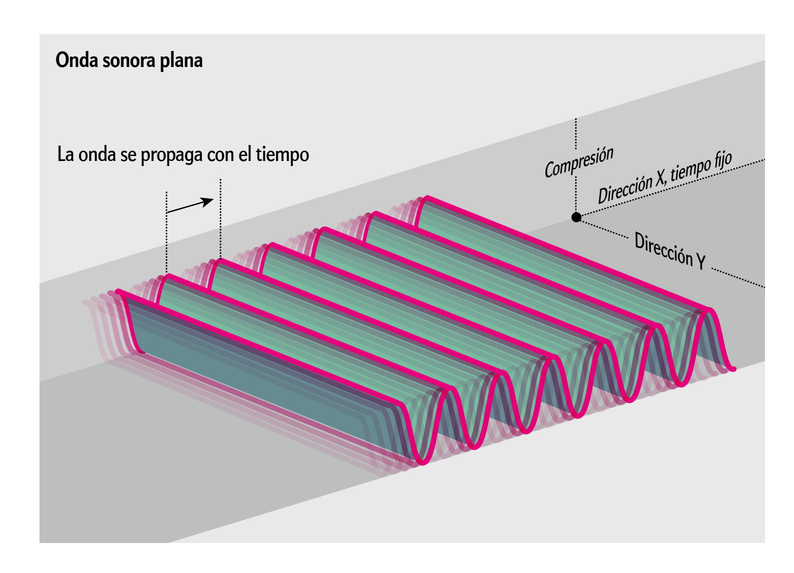
Sin embargo, estos tipos de cristales espaciotemporales no hacen más que renombrar fenómenos que ya conocemos. Para adentrarnos en territorios inexplorados, debemos considerar la segunda pregunta de Shapere. Y eso requiere introducir la idea de ruptura espontánea de simetría.

RUPTURA ESPONTÁNEA DE SIMETRÍA

Cuando un líquido o un gas se enfría y cristaliza, ocurre algo notable: la nueva solución de las leyes físicas (el cristal) presenta menos simetría que las propias leyes. Como esta reducción de la simetría aparece simplemente al bajar la temperatura, sin ninguna intervención externa especial, decimos que la simetría bajo traslaciones espaciales se rompe «espontáneamente».

Otra característica importante de la cristalización es que se produce un cambio brusco en el comportamiento del sistema, lo que en lenguaje técnico se llama una transición de fase discontinua. Por encima de una cierta temperatura crítica (que depende de la composición química del sistema y de la presión ambiente) tenemos un líquido; por debajo de ella, un cristal, que es un objeto con unas propiedades muy diferentes. La transición ocurre de forma predecible y conlleva la emisión de energía en forma de calor. El hecho de que un pequeño cambio en las condiciones ambientales lleve a una sustancia a reorganizarse en un material cualitativamente distinto no deja de ser reseñable, por familiar que nos resulte (en el caso del agua y el hielo).

La rigidez de los cristales es otra de las propiedades que los distingue de líquidos y gases. Desde un punto de vista microscópico, surge porque el patrón organizado de los átomos del cristal persiste a grandes distancias y el sistema opone resistencia a los intentos de romper dicha ordenación.



Las tres propiedades de la cristalización que hemos mencionado (reducción de la simetría, transición de fase discontinua y rigidez) están íntimamente relacionadas. El principio básico que las explica es que los átomos «quieren» disponerse en configuraciones energéticamente favorables. Bajo distintas condiciones (por ejemplo, de presión y temperatura) pueden prevalecer diferentes configuraciones, o fases. Y cuando las condiciones cambian, a menudo presenciamos transiciones de fase discontinuas. La opción ganadora se impondrá en todo el material, ya que la formación de tales patrones requiere la acción colectiva de los átomos. Si se perturba el nuevo patrón, el sistema vuelve a su estado anterior.

Dado que la ruptura espontánea de simetría aúna un conjunto de ideas tan interesantes y con tantas implicaciones, me pareció importante explorar la posibilidad de que τ pudiera romperse espontáneamente. Mientras trabajaba en esa idea, se la expliqué a mi mujer, Betsy Devine: «Es como un cristal, pero en el tiempo». «¿Y cómo lo vas a llamar?», me preguntó intrigada por mi entusiasmo. «Ruptura espontánea de la simetría bajo traslaciones temporales», le dije, a lo que ella replicó: «Ni se te ocurra. Llámalos cristales temporales». Por supuesto, le hice caso. En 2012 publiqué dos artículos, uno de ellos con Shapere, que introducían este concepto. Así pues, un cristal temporal es un sistema en el que τ está espontáneamente rota.

Cabe preguntarse por qué nadie había combinado aún las ideas de τ y ruptura espontánea de simetría, que por separado se entendían bien desde hacía muchos años. La razón es que τ difiere de otras simetrías en un aspecto crucial, que hace de su posible ruptura espontánea una cuestión mucho más sutil. La diferencia está relacionada con un profundo teorema demostrado por la matemática Emmy Noether en 1915 [*véase* «Cien años del teorema de Noether», por David E. Rowe; Investigación y Ciencia, diciembre de 2018]. El teorema de Noether conecta la simetría con las leyes de conservación, y demuestra que a cada forma de simetría le corresponde una cantidad conservada. En relación al problema que nos ocupa, el teorema de Noether afirma que τ implica la conservación de la energía. Y al contrario: cuando un sistema rompe τ, su energía no se conserva y esta deja de ser una cantidad útil para describirlo. (De manera más precisa, sin τ no es posible construir una cantidad similar a la energía e independiente del tiempo sumando las contribuciones de las partes del sistema.)

La visión habitual es que la ruptura espontánea de simetría ocurre porque la configuración con menor simetría es favorable desde el punto de vista energético. Si el estado de mínima energía rompe la simetría espacial y la energía del sistema se conserva, dicho estado persistirá una vez que se alcance. Así es como los científicos explican la cristalización ordinaria.

Pero una explicación en términos energéticos no sirve para la ruptura de τ, ya que esta elimina la posibilidad de usar la energía. Esta evidente dificultad situó la posibilidad de la ruptura espontánea de τ, y la noción asociada de cristal temporal, más allá del horizonte conceptual de la mayoría de los físicos.

No obstante, hay un modo más general de entender la ruptura espontánea de simetría que sí es aplicable al caso de τ. En vez de reorganizarse espontáneamente para alcanzar un estado de menor energía, un material podría pasar a un estado que fuera más estable por otras razones. Por ejemplo, no es fácil desbaratar los patrones ordenados que se extienden a lo largo

de grandes distancias o períodos de tiempo e involucran muchas partículas porque la mayoría de fuerzas disruptivas actúan a pequeñas escalas locales. Así, un material podría aumentar su estabilidad adoptando un nuevo patrón que ocurriese a escalas mayores.

Por supuesto, ningún estado ordinario de la materia puede aguantar todas las disrupciones. Pensemos en los diamantes. Una mítica campaña de publicidad popularizó el eslogan «un diamante es para siempre». Pero, en la atmósfera adecuada y a suficiente temperatura, un diamante puede arder y convertirse en cenizas. En realidad, los diamantes no son un estado estable del carbono a las temperaturas y presiones habituales: se crean a presiones mucho más altas y, una vez formados, sobreviven mucho tiempo a presiones ordinarias. Pero los físicos estiman que un diamante acabará convirtiéndose en grafito si esperamos lo suficiente. También podría ser que las fluctuaciones cuánticas convirtiesen el diamante en un minúsculo agujero negro, aunque esto es aún menos probable. O que la desintegración de sus protones lo fuera erosionando poco a poco. En la práctica, un «estado de la materia» (como el diamante) es una configuración de una sustancia que presenta un cierto grado de estabilidad frente a un amplio abanico de cambios externos.

CRISTALES TEMPORALES ANTIGUOS Y NUEVOS

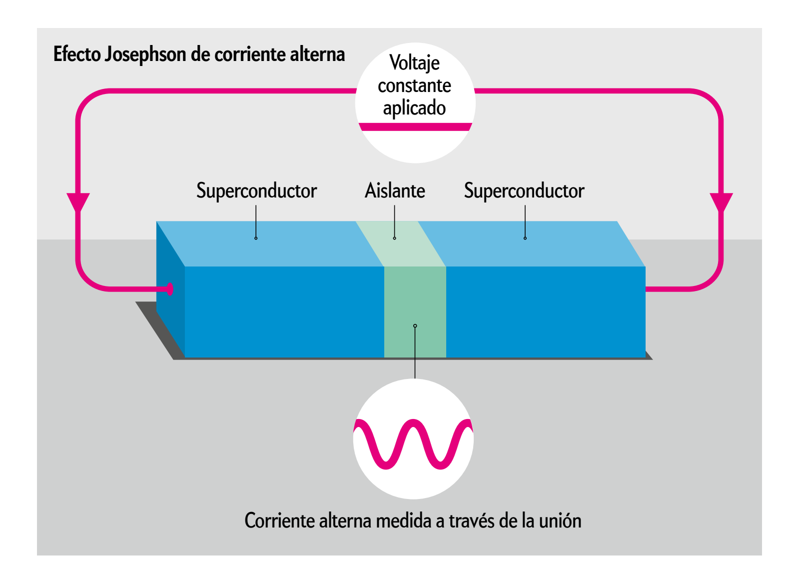
El efecto Josephson de corriente alterna es una de las joyas de la física y constituye el prototipo de una gran familia de cristales temporales. Se produce cuando aplicamos un voltaje constante V a través de un aislante que separa dos materiales superconductores (lo que se conoce como una unión Josephson, en honor del físico Brian Josephson). En esta situación, se observa una corriente alterna con frecuencia $2eV/\hbar$ a través de la unión, donde e es la carga del electrón y $\hbar$ es la constante de Planck reducida. Por tanto, aunque la configuración física del sistema no varía con el tiempo (es decir, respeta τ), su comportamiento sí lo hace. La simetría completa bajo traslaciones temporales se ha reducido a una simetría bajo traslaciones temporales por múltiplos del período $\hbar/2eV$.

El efecto Josephson de corriente alterna encarna el concepto más básico de un cristal temporal. Sin embargo, en algunos aspectos, no es un sistema ideal. Para mantener el voltaje hay que cerrar el circuito y conectar una batería. Pero los circuitos de corriente alterna tienden a disipar calor y las baterías acaban por agotarse. Además, las corrientes oscilantes emiten ondas electromagnéticas. Por todas estas razones, las uniones Josephson no son completamente estables.

Introduciendo diversas mejoras (como circuitos superconductores, condensadores eficientes en lugar de baterías ordinarias y barreras para atrapar la radiación) es posible paliar sustancialmente esas deficiencias. Y otros sistemas basados en superfluidos o imanes en vez de en superconductores exhiben efectos físicos análogos, al tiempo que minimizan los problemas. En un trabajo reciente, Nikolay Prokof'ev y Boris Svistunov han propuesto excelentes ejemplos de cristales temporales usando dos superfluidos interpenetrantes.

Pensar en la ruptura de τ ha puesto el foco en estos asuntos y ha permitido descubrir nuevos ejemplos y diseñar experimentos útiles. Pese a ello, como la idea central ya estaba implícita en el trabajo de Josephson de 1962, parece adecuado referirse a todos estos sistemas como cristales temporales «antiguos».

Los «nuevos» cristales temporales llegaron con el número del 9 de marzo de 2017 de la revista *Nature*, cuya portada mostraba unos preciosos (y metafóricos) cristales temporales y anunciaba «Cristales temporales: Primeras observaciones de un nuevo estado exótico de la materia». En el interior, dos artículos independientes daban cuenta del descubrimiento. En uno de los experimentos, un equipo dirigido por Christopher Monroe, de la Universidad de Maryland en College Park, creó un cristal temporal a partir de una cadena de iones de iterbio. En el otro, el grupo de Mikhail Lukin en Harvard empleó un sistema formado por muchos miles de defectos (los llamados centros nitrógeno-vacante) de un diamante.



En ambos sistemas, los espines de los átomos (los iones de iterbio o los defectos del diamante) cambian regularmente de dirección, con lo que periódicamente se regresa a la configuración original. En el experimento de Monroe, los investigadores usaron láseres para invertir el espín de los iones y correlacionarlos, dando lugar a estados entrelazados. Como resultado, los espines de los iones comenzaron a oscilar, pero con solo la mitad de frecuencia que los pulsos láser. Lukin y su equipo emplearon pulsos de microondas para invertir los espines de los defectos del diamante. Observaron cristales temporales con períodos dos y tres veces mayores que el de los pulsos. En ambos estudios, los materiales recibieron estimulación externa (mediante láseres o pulsos de microondas), pero adquirieron un período diferente al de los estímulos. En otras palabras, rompieron la simetría temporal de forma espontánea.

Estos experimentos iniciaron una línea de trabajo en física de materiales que ha crecido hasta convertirse en una pequeña industria. Desde entonces han aparecido más materiales basados en los mismos principios (bautizados como «cristales temporales de Floquet») y se están investigando muchos otros.

Los cristales temporales de Floquet difieren en aspectos importantes de otros fenómenos relacionados descubiertos mucho antes. Por ejemplo, en 1831 Michael Faraday observó que, al agitar verticalmente una masa de mercurio con período T, el flujo resultante a menudo tenía período $2T$. Pero la ruptura de simetría en el sistema de Faraday —y en muchos otros estudiados hasta 2017— no permite establecer una separación clara entre el material y el estímulo (en este caso, el acto de agitar) y no presenta las señales distintivas de la ruptura espontánea de simetría. La

acción externa no deja de aportar energía (o entropía, siendo más precisos) al material, que la irradia en forma de calor.

Lo que sucede es simplemente que el sistema completo formado por el material y el estímulo posee menos simetría que este último por separado. Por el contrario, en los sistemas descubiertos en 2017, tras un breve régimen transitorio el material alcanza un estado estacionario en el que ya no intercambia energía o entropía con la acción externa. La diferencia es sutil pero clave desde el punto de vista físico. Los nuevos cristales temporales de Floquet representan fases de la materia distintas y muestran las señales típicas de la ruptura espontánea de simetría.

En ese sentido, la rotación de la Tierra o su revolución anual alrededor del Sol no constituyen cristales temporales. Su impresionante estabilidad viene impuesta por la conservación aproximada de la energía y del momento angular. Estas cantidades no toman los valores mínimos, así que no es posible justificar la estabilidad en términos energéticos. Dichos sistemas tampoco involucran patrones a gran escala. Pero precisamente debido a los enormes valores de la energía y el momento angular, introducir cambios significativos en ellos requiere perturbaciones grandes o que actúen durante mucho tiempo. Ciertamente, efectos como las mareas, la influencia gravitatoria de otros planetas o incluso la evolución del Sol alteran ligeramente esos sistemas astronómicos y obligan a corregir de vez en cuando las medidas de tiempo asociadas a ellos, como el día o el año.

En cambio, los patrones de los nuevos cristales temporales exhiben una gran rigidez y estabilidad. Eso proporciona una forma de dividir el tiempo con gran precisión, lo que podría resultar clave para construir relojes más avanzados. Los modernos relojes atómicos son prodigios de exactitud, pero carecen de la garantía de estabilidad a largo plazo de los cristales temporales. Estos nuevos estados de la materia podrían dar lugar a relojes más precisos y menos complicados, capaces de realizar medidas exquisitas de la distancia y el tiempo. Las aplicaciones irían desde sistemas GPS mejorados hasta nuevos métodos para descubrir cuevas subterráneas y depósitos minerales a través de su influencia en la gravedad, o incluso la detección de ondas gravitacionales. La Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa de EE.UU. (DARPA) financia la investigación en cristales temporales con estas posibilidades en mente.

EXPERIMENTOS

Cómo hacer un cristal temporal

En los cristales ordinarios, los átomos repiten su disposición cada cierta distancia. De modo análogo, los cristales temporales son estados de la materia que se repiten cada cierto tiempo. Los primeros materiales nuevos que encajan en esta categoría fueron descubiertos en 2017 por dos equipos de investigación: uno liderado por Mikhail Lukin, de Harvard, y el otro por Christopher Monroe, de la Universidad de Maryland en College Park.

El experimento de Lukin

El grupo de Lukin creó un cristal temporal manipulando los espines de los átomos en los llamados «centros nitrógeno-vacante» (impurezas en la red de un diamante). Los investigadores irradiaron periódicamente el diamante con pulsos láser. Entre dos pulsos, los espines seguían interaccionando entre sí. El sistema repitió periódicamente su configuración global, aunque no con el mismo período que los pulsos de microondas. En cambio, el sistema adoptó su propia frecuencia, inferior a la de los pulsos.

EL UNIVERSO DE τ

El conjunto de ideas y experimentos en torno a los cristales temporales y la ruptura espontánea de τ constituye un campo que se encuentra aún en su infancia. Hay muchas incógnitas por resolver y numerosos frentes de crecimiento. Un proyecto en curso es ampliar la lista de cristales temporales físicos —diseñando nuevos materiales de este tipo y descubriéndolos en la naturaleza— con ejemplos más prácticos y que muestren una mayor variedad de patrones espaciotemporales. Los físicos también pretenden analizar y comprender las transiciones de fase que hacen que la materia adquiera y abandone estos estados.

Otro objetivo es examinar en detalle las propiedades físicas de los cristales temporales (y también de los espaciotemporales, en los que tanto la simetría espacial como τ están espontáneamente rotas). El ejemplo de los cristales semiconductores mencionado al principio es inspirador: ¿qué descubriremos al estudiar la manera en que los cristales temporales modifican el comportamiento de los electrones y la luz que se propagan en su interior?

Una vez que hemos aceptado la posibilidad de tener estados de la materia donde interviene el tiempo, además de los cristales temporales podemos considerar cuasicristales temporales (materiales muy ordenados pero sin patrones repetitivos), líquidos temporales (en los que la densidad temporal de eventos es constante pero el período no lo es) y vidrios temporales

(con un patrón que parece perfectamente rígido pero que en realidad presenta pequeñas desviaciones). Los investigadores están explorando activamente estas y otras posibilidades y ya han identificado algunas formas de cuasicristales temporales y una clase de líquido temporal.

Hasta ahora hemos considerado fases de la materia en las que interviene τ. Concluiré con dos breves comentarios sobre τ en cosmología y en los agujeros negros.

La teoría del estado estacionario del universo, popular a mediados del siglo xx, constituyó un intento de mantener τ en cosmología. Este modelo postulaba que el estado del universo (o su aspecto) a grandes escalas no dependía del tiempo; es decir, que retiene la simetría bajo traslaciones temporales. Aunque el universo se expande, la teoría proponía una creación continua de materia que haría que la densidad media del cosmos se mantuviera constante. Pero aquel modelo no resistió la prueba del tiempo. Los astrónomos han reunido pruebas abrumadoras de que, hace 13.700 millones de años, tras la gran explosión, el universo era un lugar muy diferente, por más que rigieran las mismas leyes físicas. En ese sentido, τ está rota (quizás espontáneamente) por el universo en su conjunto. Algunos cosmólogos también han sugerido que nuestro universo es cíclico o que pasó por una fase de rápidas oscilaciones. Estas propuestas, que de momento no son sino especulaciones, nos acercan al conjunto de ideas relativas a los cristales temporales.

Finalmente, las ecuaciones de la relatividad general, que condensan nuestro conocimiento actual sobre la estructura del espaciotiempo, están basadas en la idea de que podemos especificar una distancia bien definida entre dos puntos próximos cualesquiera. No obstante, sabemos que eso deja de cumplirse al menos en dos situaciones extremas: cuando extrapolamos la teoría de la gran explosión a sus instantes iniciales, y en el interior de los agujeros negros. En otros dominios de la física, el hecho de que las ecuaciones que describen el comportamiento de un determinado estado de la materia dejen de ser válidas suele indicar que el sistema va a experimentar una transición de fase. ¿Podría ser que en condiciones extremas (de presiones altas, temperaturas elevadas o cambios rápidos) el propio espaciotiempo abandone τ?

En definitiva, el concepto de los cristales temporales ofrece la oportunidad de realizar avances teóricos (como comprender la cosmología y los agujeros negros desde otra perspectiva) y prácticos. Los nuevos tipos de cristales temporales que previsiblemente aparecerán en los próximos años deberían acercarnos a la meta de desarrollar relojes más perfectos y podrían presentar otras propiedades útiles. Al margen de esto, son sistemas interesantes en sí mismos que nos permiten ampliar nuestras ideas sobre cómo puede organizarse la materia. IyC

PARA SABER MÁS

Quantum time crystals. Frank Wilczek en *Physical Review Letters*, vol. 109, n.º 16, art. 160401, octubre de 2012.
Classical time crystals. Alfred Shapere y Frank Wilczek en *Physical Review Letters*, vol. 109, n.º 16, art. 160402, octubre de 2012.
Observation of a discrete time crystal. Jiehang Zhang et al. en *Nature*, vol. 543, págs. 217-220, marzo de 2017.
Observation of a discrete time-crystalline order in a disordered dipolar many-body system. Soonwon Choi et al. en *Nature*, vol. 543, págs. 221-225, marzo de 2017.
Time crystals: A review. Krzysztof Sacha y Jakub Zakrzewski en *Reports of Progress in Physics*, vol. 81, n.º 1, art. 016401, enero de 2018.
Time crystals in periodically driven systems. Norman Y. Yao y Chetan Nayak en *Physics Today*, vol. 71, n.º 19, págs. 40-47, septiembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cristales temporales. Piers Coleman en *IyC*, agosto de 2013.



LOS BIÓLOGOS se afanan por catalogar las especies nuevas por toda Colombia. Con los datos recolectados recomiendan políticas económicas que conserven la biodiversidad, en lugar de acabar con ella.

SOSTENIBILIDAD

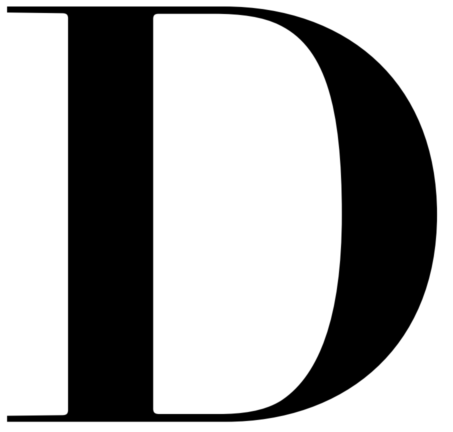
Colombia: del conflicto a la economía verde

Después de medio siglo de guerra, el país quiere crear una economía basada en la conservación de la biodiversidad

Rachel Nuwer

Rachel Nuwer es periodista científica. Escribe para publicaciones como *Scientific American*, *New Scientist* y *New York Times* y es autora de *Poached: Inside the dark world of wildlife trafficking* (Da Capo Press, 2018).





URANTE TODA AQUELLA JORNADA SE HABÍAN IDO CONGREGANDO SObre Cubará gruesos nubarrones que levantaron un viento polvoriento y dejaron las colinas boscosas inmersas en la penumbra y la bruma. Cuando al fin rompió a diluviar, el agua, que repiqueteaba con saña en las cubiertas de metal, desbordó las cunetas y convirtió la carretera y los caminos en torrentes. Recién llegado desde Bogotá, un equipo de biólogos no pudo hacer otra cosa que buscar cobijo bajo un porche, a la espera de iniciar lo que les había traído hasta allí: la búsqueda y catalogación de cuantas especies de aves fuera posible.

Desde 1961 no se había emprendido un censo de tal magnitud en esta remota localidad del noreste de Colombia. El principal motivo es que, hasta hace pocos años, era demasiado peligroso.

Cubará se halla en el centro de una antigua zona vedada, tristemente conocida por las frecuentes escaramuzas entre los guerrilleros, las fuerzas paramilitares y el Ejército colombiano. En 2016, el Gobierno firmó un acuerdo de alto el fuego con las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC), el mayor grupo rebelde del país, que puso fin al conflicto más antiguo del hemisferio occidental. Aunque los disparos ya no resuenan, el recuerdo de la violencia sigue siendo demasiado reciente para mucha gente. Como el teniente alcalde de la localidad me dijo cuando nos conocimos: «La felicito por venir hasta aquí. Pocos nos visitan por miedo a lo que pueda ocurrir».

Ahora que se ha instaurado una paz frágil, Cubará, como miles de otras poblaciones colombianas, intenta volver poco a poco a la vida. El final de la lucha ha supuesto un nuevo comienzo, no solo para los pueblos ansiosos por iniciar la reconstrucción, sino también para los científicos del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, una entidad independiente sin ánimo de lucro que espera por fin catalogar el patrimonio natural del país. Flanqueada por dos continentes y dos océanos y atravesada por el ecuador y los Andes, Colombia acoge 311 reservas ecológicas, desde selvas pluviales y montañas hasta manglares y arrecifes de coral. Las especies catalogadas en su territorio suman casi las 63.000, nada menos que un 10 por ciento de la biodiversidad mundial. Solo Brasil la supera en abundancia, pero con una extensión siete veces mayor.

Esta riqueza saltaba a la vista mientras el equipo se resguardaba del aguacero. Unos siriríes comunes (*Tyrannus melancholicus*) revoloteaban en torno a una farola, al tiempo que unos caracoles gigantes africanos (*Achatina fulica*), especie invasora, se deslizaban por el porche. Un escarabajo grande como un puño correteaba, probablemente en busca de pareja, mientras un sapito del tamaño de un grano de uva se estaba dando un atracón a costa de una legión de termitas. Un extraño animal

PÁGINAS ANTERIORES: FELIPE VILLEGAS, INSTITUTO HUMBOLDT

EN SÍNTESIS

Colombia alberga una flora y una fauna casi sin rival en el planeta. Pero, durante medio siglo, la guerra acabó con los estudios de campo y estancó el progreso científico. El tratado de paz firmado en 2016 ha abierto regiones antes inaccesibles, por lo que los biólogos se afanan en catalogar las especies inéditas.

Los investigadores del Instituto Humboldt ocupan una posición única para demostrar que la conservación de la biodiversidad es un elemento clave de la economía verde y están asesorando al Gobierno en este aspecto.

La paz ha conllevado una alarmante deforestación, por lo que el instituto promueve con urgencia una economía basada en sectores productivos como el aprovechamiento agroforestal y el ecoturismo, que traen prosperidad a las zonas rurales pero no a expensas del ambiente.


1


2


3

LA COLABORACIÓN con expertos del país, como Saúl Sánchez (*1*, *2*), para inventariar la avifauna y fomentar el ecoturismo ya ha comenzado. Otra investigadora capta el canto de las aves con un micrófono parabólico (*3*).



serpentiforme que el biólogo Orlando Acevedo-Charry atrapó en la calzada inundada y que, a primera vista, había tomado por una serpiente o una cecilia, acabó siendo una anguila de río marmolada (*Synbrachus marmoratus*).

Es probable que muchas más especies aguarden a ser descubiertas [*véase* «Biodiversidad escondida», por Carlos Iván Espinosa y Luis Cayuela; Investigación y Ciencia, julio de 2015]. En nueve grandes expediciones emprendidas por todo el país desde 2015, se han clasificado cientos de plantas, animales y hongos, docenas de ellos desconocidos para la ciencia. Por citar algunos: una raya de agua dulce con lunares que recuerdan a un leopardo, una singular esponja que se enrolla en las ramas de los mangles como un nido de insecto, y un pez sin ojos. «¿Se da cuenta de que nos hallamos en 2019 y aún estamos descubriendo lo que tenemos?», observa Gisele Didier López, a cargo de la unidad de desarrollo del Instituto Humboldt.

Pero al mismo tiempo que la paz hace accesibles a la exploración lugares como Cubará, también da paso franco al desarrollo. La selva retrocede ante el desmonte y la apertura de nuevas carreteras. «El ritmo al que el paisaje cambia sobrepasa nuestra capacidad de investigación. Si no catalogamos con rapidez la biodiversidad de Colombia, la perderemos antes de que sepamos qué hemos de proteger», advierte Acevedo-Charry, responsable de la fonoteca ambiental del instituto.

Él, Didier y sus colaboradores se hallan a la cabeza de los esfuerzos que no solo persiguen descubrir la envergadura de la biodiversidad del país, sino también hallar formas de convertirla en el elemento central de una sociedad impulsada por la sostenibilidad, la resiliencia y la economía verde. «No se trata de la clásica visión de no tocar. Queremos que la biodiversidad sea uno de los ingredientes de la receta para el crecimiento económico, sin acabar con ella», matiza Didier. El objetivo último, en palabras suyas, es «convertir la biodiversidad en un capital activo para el desarrollo».

Desde 2016, los 123 expertos de la institución, junto con otros científicos y organizaciones sin ánimo de lucro de Colombia y otros países, están trabajando a marchas forzadas para ofrecer una idea de lo que debería ser una Colombia verde, y para crear un plan para conseguirlo. Didier y sus colaboradores tal vez estén en una posición única para ello. Por ley, el Instituto Humboldt, financiado a partes iguales por el Gobierno y la recaudación de fondos, es el responsable del estudio y la divulgación de la biodiversidad del país. Su misión trasciende la mera catalogación: el personal también se encarga de promover la investigación aplicada para orientar la elaboración de políticas que, en definitiva, tienda puentes entre la ciudadanía y el Gobierno. Diego J. Lizcano, especialista en biodiversidad de The Nature Conservancy, explica que, gracias al vínculo di-

recto del instituto con el Gobierno, las autoridades toman más en serio sus hallazgos que los de las ONG o las universidades.

Pero conforme Colombia apresura el ritmo del desarrollo posbélico, la posibilidad de un futuro halagüeño en el que la biodiversidad sea apreciada y rentabilizada de modo sostenible se esfuma con rapidez. A pesar de la relativa influencia del instituto, los observadores afirman que el medioambiente sigue siendo una de las últimas prioridades del Gobierno y que la deforestación continúa devastando gran parte del país.

GUERRA Y PAZ (VERDE)

Que tanta vida silvestre y tantos hábitats naturales pervivan hoy en Colombia es, en parte, una consecuencia venturosa del conflicto. La guerra civil estalló oficialmente en 1964, cuando un colectivo integrado mayoritariamente por pequeños agricultores, jornaleros agrícolas y mineros se alzó en armas contra la desigualdad flagrante y fundaron las FARC. El medio siglo de lucha armada no solo puso fin a cualquier estudio ecológico; también paralizó, en algunos lugares, la destrucción del ambiente.

Millones de personas abandonaron el campo en busca de refugio en las ciudades, una ocasión que la naturaleza aprovechó para reclamar sus dominios. Los rebeldes ordenaron a los que se quedaron que evitaran entrar en ciertas zonas de la selva y les prohibieron que cazaran o talaran los árboles. Lo que comenzó como una pugna ideológica por un Gobierno marxista-leninista derivó en un conflicto alimentado en buena medida por el lucro que generaba, sobre todo, el narcotráfico. Florecieron las plantaciones de coca y los laboratorios de cocaína en campamentos improvisados en medio de la selva. «Las guerrillas sacaron buen partido de la espesura como escondrijo y nadie más osaba adentrarse en ella. La naturaleza permaneció así intocada en las zonas candentes», explica Didier.

La violencia siguió la estela del narcotráfico. Cualquier investigador de campo que se aventurase en las zonas controladas por los rebeldes ponía en riesgo su vida. Cuesta encontrar uno en el país que no tenga una historia que contar sobre secuestros, interrogatorios a punta de pistola o huidas precipitadas de los lugares de estudio. «Hace diez años, lo más peligroso con lo que uno podía toparse en el camino era una persona», cuenta Lizcano, que estuvo retenido dos días por los rebeldes mientras andaba en busca de tapires. Él continuó con su labor en otro lugar, pero otros estudios se cancelaron o nunca se llevaron a cabo, y muchos investigadores optaron por abandonar el país o cambiar de profesión. El conocimiento ecológico quedó estancado.

La esperanza de un giro radical en esta tendencia provino de uno de los casi 600 puntos del tratado de paz firmado en 2016: el país tendrá que desarrollarse de forma sostenible para mejorar la vida de todos los colombianos; no solo la de los habitantes de las ciudades, que constituyen al menos tres cuartas partes de la población. Este punto tiene sobre todo por objeto acabar con el descontento rural que desató el conflicto en su día, y promete a la población marginada del campo —la mayoría perteneciente a las 112 etnias minoritarias del país— el acceso a la educación y al agua potable, a los subsidios para programas de desarrollo en los antiguos territorios guerrilleros, y a nuevas vías de comunicación que conecten sus pueblos y aldeas con el resto del país. Asimismo, insta a los cultivadores ilegales de coca a sustituirla por otros cultivos a cambio de pagos en efectivo y ayuda institucional.

«Muchos de nuestros problemas se deben a la carencia de condiciones de vida dignas, de educación y de sanidad en las zonas rurales, por lo que para mí esta era la parte principal de los acuerdos», afirma Julia Miranda Londoño, directora general del Sistema de Parques Nacionales de Colombia. «Si el desarrollo fuera más equitativo, la gente no se vería abocada a ganarse la vida con el cultivo de la coca o la minería ilegal.»

Si bien los científicos del Instituto Humboldt y otros investigadores creen que la biodiversidad puede desempeñar un papel primordial en ese desarrollo equitativo, la cuestión es cómo hacer que llegue a todos los rincones de la nación. Los colombianos no quieren que su país comparta el mismo destino que el de San Martín, en Perú. Esta región, antaño también azotada por la guerra, experimentó un rápido desarrollo, pero ahora está totalmente deforestada y como secuela sufre graves incendios, corrimientos de tierra e inundaciones. Tampoco quieren basar por entero sus planes en ejemplos positivos de conservación ambiental en lugares como Costa Rica y Ruanda, pues ambos países son mucho más pequeños y no han sufrido cincuenta años de guerra. Los países escandinavos ofrecen ejemplos paradigmáticos del aprovechamiento de los recursos naturales y del uso de las energías renovables, pero a diferencia de Colombia, cuentan con algunas de las economías más sólidas del mundo.

Si el aprovechamiento agroforestal se instaurase en todo el país, las selvas no acabarían siendo meras islas de biodiversidad, sino una matriz interconectada de naturaleza promovida

Así que Colombia ha trazado sus propios planes para forjar su destino, dirigidos por el Departamento de Planificación Nacional y respaldados por los científicos del país. Además de un incipiente sector ecoturístico, las ideas para esta nueva bioeconomía van desde ayudar a las comunidades indígenas y rurales a que saquen rédito de la bioprospección (la búsqueda de especies de fauna y flora medicinales, comestibles o de otros usos) hasta la aplicación de técnicas que potencien la producción acuícola y mejoren el reciclaje, casi inexistente en la región. El Ministerio de Finanzas colombiano está planteando un proyecto de ley que ampliaría la tasa de carbono al carbón y al gas, que hoy solo grava seis combustibles líquidos. El Gobierno también pretende crear su primera flota importante impulsada por fuentes de energía renovables a través de un grupo de trabajo especial dedicado a la transición energética.







UVALDINO VILLAMIZAR (*1*) cultiva el cacao con prácticas silvoagrícolas modernas. Los métodos sostenibles como los suyos contribuyen a conservar la biodiversidad de Colombia, entre ellas las especies descubiertas en los últimos años (*2*, *3* y *4*).



RACHEL NUWER (*1*); DIRK WEINMANN (*2*); DE «THE POVERTY OF ADULT MORPHOLOGY: BIOACOUSTICS, GENETICS, AND INTERNAL TADPOLE MORPHOLOGY REVEAL A NEW SPECIES OF GLASSFROG (ANURA: CENTROLENIDAE: IKAKOGI) FROM THE SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA, COLOMBIA», MARCO RADA ET AL., EN *PLOS ONE*, VOL. 14, N.º 5, ARTÍCULO E0215349, 8 DE MAYO DE 2019 (*3*); MARTA KOLANOWSKA (*4*)

El foco principal se centra en la reforma de la agricultura nacional, un sector que crecerá un 2,5 por ciento anual y cuya superficie de explotación aumentará un 44 por ciento en el próximo quindenio. «La explotación de la tierra que hacemos aquí es sumamente destructiva», asegura Brigitte Baptiste, directora del Instituto Humboldt durante los últimos diez años y, desde hace pocos meses, rectora de la Universidad EAN, en Bogotá. Los ganaderos cortan a matarrasa la selva para abrir pastos donde apenas crían cinco reses por hectárea. Los sistemas de irrigación son vetustos y muy ineficientes, una situación reconocida por los propios agricultores, afirma Baptiste. Y el país ocupa los primeros puestos mundiales en el uso de plaguicidas, que envenenan a los agricultores y contaminan el ambiente.

La explotación agroforestal, con un potencial enorme en el país, constituye una alternativa, según Baptiste y sus colaboradores. Este método, el agrosilvopastoril, integra el ganado y los cultivos en las selvas en lugar de talar la masa arbórea y, con ello, reporta beneficios como el abastecimiento de agua y la mitigación de las inundaciones y las sequías. La ganadería ocupa cerca del 70 por ciento de la superficie agraria del país, pero Colombia es también el tercer productor de café, el cuarto de aceite de palma y uno de los mayores exportadores de cacao. Si el aprovechamiento agrosilvopastoril se instaurase en todo el país, las selvas no acabarían convertidas en meras islas de biodiversidad rodeadas por territorio humanizado, sino en una matriz interconectada de naturaleza promovida por los terratenientes.

Largos tramos de la carretera que conduce a Cubará están flanqueados por campos desarbolados, donde el ganado vacuno pasta junto a los tocones. Como en tantos otros lugares de la Colombia rural, la transición al aprovechamiento agroforestal se abre paso lentamente, si bien aquí es impulsado sobre todo por movimientos populares, que no están esperando de brazos cruzados a que el Gobierno dirija el cambio. Cuando los agricultores ecológicos Mónica y Uvaldino Villamizar decidieron diversificar su actividad y cultivar cacao en 2006, diseñaron sus campos para que albergaran una veintena de especies arbóreas. Guiados por la información facilitada por la Federación Nacional de Cultivadores de Cacao, permitieron que su plantación conservara una vegetación densa y el canto de los pájaros. La diversidad en el espacio de cultivo ha traído consigo rendimientos más altos,

aseguran, porque el índice de sombreo es más favorable para las plantas. «Estamos muy contentos con este sistema; gracias a él, mi familia come y mi hija está estudiando. Quiere ser ingeniera civil», explica Uvaldino.

En el mundo, el aprovechamiento agroforestal y otras estrategias que rinden servicios ecosistémicos son incentivados a menudo con rebajas fiscales o con la subvención directa de los Gobiernos o las ONG. Por ejemplo, The Nature Conservancy, con fondos aportados por el Banco Mundial y el Gobierno británico, ha colaborado durante la última década con más de 4000 agricultores para transformar 27.000 hectáreas de territorio colombiano a ese aprovechamiento, en concreto a la ganadería extensiva sostenible. Con este sistema silvopastoril, el ganadero planta árboles de una lista con más de medio centenar de especies autóctonas que ofrecen sombra y alimento a las vacas. Al mismo tiempo, los árboles dan cobijo a otras especies y capturan y almacenan el carbono atmosférico.

Desde el inicio del proyecto, los rancheros participantes han notificado un aumento de hasta el 80 por ciento en la producción de leche y carne. Los beneficios también han aumentado porque los productos ecológicos alcanzan precios más altos en ciudades como Bogotá, donde cada vez más gente está dispuesta a pagar más por carne, leche o chocolate de producción ecológica. Dos empresas cárnicas y lácteas del país ya están adquiriendo y anunciando productos respetuosos con la selva, y cada vez más restaurantes (entre ellos, la popular cadena nacional Crepes & Waffles) se están sumando a la iniciativa, a menudo por la presión directa de la clientela. «El mercado interno está listo para aceptar leche, carne, frutas y hortalizas que no comporten la destrucción de la selva», explica Lizcano.

El Ministerio de Agricultura quería tener un nuevo programa de ganadería extensiva ecológica firmado a finales de 2019, un movimiento por el que los científicos y las ONG han estado presionando desde hace años. Carolina Jaramillo, representante de Colombia en el Instituto Mundial de Crecimiento Verde, afirma que unas medidas políticas que proporcionasen incentivos económicos y asesoramiento logístico supondrían «una completa transformación técnica, económica y cultural para el país».

PRONÓSTICO INCIERTO

A pesar de todas esas promesas, Colombia sufre «las mismas trabas o la misma falta de voluntad política que cualquier otro país que esté intentando crear una economía sostenible», asegura Andrés Gómez, veterano investigador de la biodiversidad en ICF International, una empresa de asesoría global. A ello se suman los problemas internos del país: el narcotráfico que sigue azotando varias regiones, las tensas relaciones que muchas de las 112 minorías étnicas mantienen con el Gobierno y, por si fuera poco, la crisis migratoria desatada por el caos y la bancarrota de la vecina Venezuela. Entretanto, otro grupo rebelde, el Ejército de Liberación Nacional, aún no ha aceptado un acuerdo de paz.

De todas esas amenazas, la más peligrosa para la biodiversidad del país es la deforestación. A escala nacional ha crecido un 44 por ciento de 2015 a 2016, y si bien la extensión de las zonas protegidas se ha duplicado en los últimos ocho años, el 84 por ciento de la deforestación se ha concentrado en esas tierras. Según el Instituto Humboldt, entre 2013 y 2017 se han talado más de 40.000 hectáreas en los parques nacionales.

Los científicos no han analizado formalmente los factores que se esconden detrás de esas pérdidas, pero señalan a diversos precipitantes. En unas zonas, son la tala y la minería aurífera ilegales; en otras, el cultivo de la coca. Las apropiaciones de tierra y las posteriores ventas constituyen un instrumento habitual para blanquear el dinero procedente de las actividades ilícitas, explica Baptiste, y la corrupción no hace sino facilitar el proceso. Además, muchos de los 6,9 millones de colombianos desplazados han comenzado a regresar a sus antiguos hogares en el campo, donde reclaman tierras como propiedad. Los desplazados que talan la selva «aducen que han sufrido las consecuencias de la guerra. Pero uno no tiene derecho a cometer un delito para satisfacer sus necesidades», replica Miranda Londoño. Jaramillo plantea la necesidad de «una profunda reforma rural», que daría a las personas más humildes el acceso a tierras que ya han sido deforestadas. Pero de momento un proyecto de tal magnitud ni siquiera se plantea, asegura.

El destino final de la selva y de otros recursos naturales dependerá de si los colombianos abrazan el medioambiente como un pilar de la nueva economía verde y no lo consideran un obstáculo para su bienestar

Los intentos por evitar la deforestación, no importa de donde vengan, pueden costar la vida. En 2017, fueron asesinados más de 30 activistas medioambientales en Colombia, y los guardas forestales que deciden intervenir contra las apropiaciones de tierra reciben a menudo amenazas de muerte. La legislación del país prohíbe tajantemente la deforestación, y sus tribunales están preparados para perseguir a los implicados en ella, explica Baptiste, pero la capacidad para imponer la ley es aún muy limitada sobre el terreno. A pesar de las numerosas detenciones, no hay indicios de que la deforestación esté aminorando. En un artículo en preparación, los investigadores del Instituto Humboldt analizaron las pautas de la deforestación desde 2000 a 2015 con objeto de identificar los factores que contribuyen a ella, como la expansión de las pistas y las carreteras, las plantaciones de coca y la guerra. Con esos datos elaboraron un modelo de predicción según el cual, si nada cambia, Colombia habrá perdido otros 7,3 millones de hectáreas de selva en 2050, el 7 por ciento de toda la superficie forestal. Más del 50 por ciento de las pérdidas se concentrarán en las zonas que han sufrido los conflictos armados.



LA ECÓLOGA BRIGITTE BAPTISTE, directora del Instituto Humboldt hasta el pasado septiembre, ha alcanzado la fama en Colombia como defensora de la economía verde.

FELIPE VILLEGAS, INSTITUTO HUMBOLDT

El destino final de la selva y de otros recursos naturales dependerá de si los colombianos abrazan el medioambiente como un pilar de la nueva economía verde y no lo repudian como un obstáculo para la mejora de su bienestar. «A menos que creemos oportunidades reales basadas en el provecho que se puede obtener de la biodiversidad, la conservación fracasará», afirma José Manuel Ochoa Quintero, coordinador del programa en el Instituto Humboldt.

Baptiste ha adquirido cotas de celebridad por asumir un papel de liderazgo en el fomento de ese plan. Es famosa en Colombia tanto por su carismática predicación en favor del medioambiente como por su condición de mujer transgénero en un país conservador. Aparece frecuentemente en la televisión y es citada en los medios, al igual que un creciente número de personajes famosos que han suscrito las campañas contra la deforestación.

El modo de ver las cosas parece estar cambiando. Cuando el presidente Iván Duque Márquez asumió el cargo en agosto de 2018, el plan de su administración para acabar con la deforestación contemplaba la fumigación con herbicidas de los cultivos de coca, a expensas de la pérdida irremediable de miles de kilómetros cuadrados de naturaleza virgen. Pero el anuncio fue recibido con duras críticas por parte de la ciudadanía y de los medios, por lo que los responsables tuvieron que echar marcha atrás y reelaborar su plan. La deforestación se considera ahora un problema de seguridad nacional.

Si es cierto que el entusiasmo por la biodiversidad está en auge, quizás el mejor indicio guarde relación con el hecho de que el país acoge el 20 por ciento de todas las aves conocidas. Según un artículo publicado en 2017 en *Tropical Conservation Science*, el turismo ornitológico depara «posibilidades inmensas» para Colombia. Los autores afirman que Perú ha duplicado el turismo de avistamiento de aves desde 2012 a 2013, y que ahora ingresa cada año 80 millones de euros, buena parte de los cuales revierte en las comunidades locales. A pesar de su extraordinaria avifauna, hasta 2015 Colombia no había participado nunca en el Gran Día Mundial de la Universidad Cornell, un certamen anual en el que aficionados de todo el mundo compiten por ver qué país es capaz de anotarse el mayor número de especies avistadas en 24 horas. En 2017, después de dos años de «participación anómala», como Acevedo-Charry la describe, el país salió victorioso, con 1486 especies. El orgullo nacional creció hasta las nubes.

Una Colombia segura de sí misma lograría conservar el título un año después: las emisoras de radio emitieron anuncios que llamaban a participar, y las cadenas de televisión y los periódicos difundieron relatos sobre el acontecimiento. La campaña funcionó: cerca de 4500 aficionados, entre ellos miembros de la fuerza aérea y de la policía, se apostaron en 730 lugares. En Cubará, Acevedo-Charry, Johana Zuluaga-Bonilla, presidenta de la Asociación Ornitológica de Boyacá-Ixobrychus, y Saúl Sánchez, un antiguo cazador redimido en conservacionista, anotaron 111 entre los tres, lo cual hizo que la región pasara de ser un interrogante en el mapa a una zona de alta biodiversidad. En toda Colombia, los aficionados vieron y escucharon 1546 especies; una cifra «impensable» para un solo país en un día, escribieron los organizadores de la competición. En 2019, Colombia volvió a colgarse el oro.

Este entusiasmo se traduce en opciones económicamente viables para los residentes rurales, de ahí que cazadores, pequeños agricultores y leñadores estén abandonando su viejo modo de vida en favor de la ornitología, el ecoturismo y el aprovechamiento agroforestal. Hace menos de una década los colombianos no podían imaginar que un día se reunirían para disfrutar de su biodiversidad avistando aves, menos siquiera que se convertirían en un país impulsado por su patrimonio natural, afirma Acevedo-Charry. Si más gente adopta ese nuevo modo de ver las cosas, todo podría cambiar: las imágenes captadas por satélite que la Universidad de Medellín ha analizado en fechas recientes indican que el ritmo de la deforestación va a la baja con respecto a inicios de 2018. «La economía basada en la biodiversidad ya está infundiendo esperanza a los que más la necesitan. Ya está cambiando su vida», concluye Acevedo-Charry.

PARA SABER MÁS

Chocolate de paz. Documental dirigido por Gwen Burnyeat y Pablo Mejía Trujillo, 2016. vimeo.com/178065947

Greening peace in Colombia. Brigitte Baptiste et al. en *Nature Ecology & Evolution*, vol. 1, artículo n.° 0102, marzo de 2017.

Tras la violencia. Sara Reardon en *Nature*, vol. 557, págs. 19-24, mayo de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

La controvertida gestión de la pluviselva tropical. Richard E. Rice, Raymond E. Gullison y John W. Reid en *IyC*, junio de 1997.

La pluviselva, de nuevo amenazada. Richard Schiffman en *IyC*, junio de 2015.



ECONOMÍA

¿ES INEVITABLE LA DESIGUALDAD?

Un nuevo método desarrollado por físicos y matemáticos describe la distribución de la riqueza en las economías modernas con una precisión sin precedentes

Bruce M. Boghosian

ILUSTRACIONES DE HANNA BARCZUK

Bruce M. Boghosian es profesor de matemáticas en la Universidad Tufts, donde investiga las aplicaciones de las teorías de la probabilidad y de los sistemas dinámicos.



La desigualdad en la distribución de la riqueza está aumentando a un ritmo alarmante en países tan diversos como EE.UU., Rusia, India y Brasil. Según el banco Credit Suisse, entre la crisis financiera de 2008 y el año 2018, la fracción de la riqueza de los hogares acaparada por el 1 por ciento más rico de la población mundial pasó del 42,5 al 47,2 por ciento. En otras palabras: en 2010, 388 individuos eran tan ricos como la mitad más pobre de la población mundial (unos 3500 millones de personas). Hoy ese número es 26, de acuerdo con los cálculos de Oxfam. Las estadísticas de casi todas las naciones que miden la riqueza de las familias indican que está cada vez más concentrada.

Aunque el origen de la desigualdad sigue siendo objeto de acalorados debates, una técnica desarrollada por físicos y matemáticos, entre ellos mi grupo de la Universidad Tufts, indica que podría residir en una peculiaridad aritmética muy conocida. Dicho método emplea modelos de distribución de la riqueza «basados en agentes». Estos comienzan con una transacción entre dos agentes o actores, cada uno de los cuales trata de optimizar sus resultados económicos. En el mundo moderno, nada podría parecer más justo o natural que dos personas que deciden intercambiar bienes, acuerdan un precio y se dan un apretón de manos. La aparente estabilidad del sistema económico que surge de este equilibrio entre la oferta y la demanda de actores individuales se percibe como una de las cumbres del pensamiento ilustrado, hasta tal punto que mucha gente ha llegado a confundir el libre mercado con la propia noción de libertad. Sin embargo, nuestros modelos matemáticos engañosamente simples y basados en transacciones voluntarias sugieren que es hora de reexaminar seriamente esa idea.

En particular, el modelo «afín» de riqueza (llamado así por sus propiedades matemáticas) describe la distribución de la riqueza de los hogares en diversos países desarrollados con una precisión exquisita, al tiempo que revela una asimetría sutil que hace que la riqueza tienda a concentrarse. Creemos que este método puramente analítico, semejante a una radiografía que no se usa tanto para representar el caos del mundo real como para revelar la estructura subyacente, proporciona una profunda comprensión de las fuerzas que impulsan el aumento actual de la pobreza y la desigualdad.

OLIGARQUÍA

En 1986, el sociólogo John Angle describió por primera vez el movimiento y la distribución de la riqueza como el resultado de las transacciones por parejas entre una colección de «agentes económicos», ya sean individuos, familias, empresas, fondos u otras entidades. Para el cambio de siglo, dos grupos de físicos (por un lado Slava Ispolatov, Pavel L. Krapivsky y Sidney Redner, que por entonces trabajaban en la Universidad de Boston; y por el otro Adrian Drăgulescu, ahora en la compañía energética Constellation, y Victor Yakovenko, de la Universidad de Maryland) habían demostrado que los modelos basados en agentes pueden analizarse con las herramientas de la física estadística, lo que permitió comprender mucho mejor su comportamiento. En muchos de esos modelos la riqueza se mueve inexorablemente de un agente a otro, incluso si se basan en intercambios justos entre actores iguales. En 2002, Anirban Chakraborti, por entonces en el Instituto Saha de Física Nuclear de Calcuta, introdujo lo que

EN SÍNTESIS

La desigualdad en la distribución de la riqueza está aumentando a un ritmo alarmante en muchos países. Un sencillo modelo desarrollado por físicos y matemáticos ha logrado reproducir este fenómeno con una precisión inusitada.

Varios modelos matemáticos de transacciones económicas presentan características propias de los materiales ferromagnéticos y otros sistemas físicos complejos, como las transiciones de fase, la ruptura de simetría y la dualidad.

Los modelos muestran que el resultado natural de una economía de libre mercado es una oligarquía absoluta, con toda la riqueza en manos de una única persona. Esta tendencia solo puede corregirse mediante mecanismos de redistribución.

se ha popularizado como el «modelo de la venta de segunda mano» (*yard-sale model*), llamado así porque comparte ciertas características con las transacciones económicas reales entre dos personas. Las simulaciones numéricas de Chakraborti demostraron que su modelo conduce de manera inevitable a la concentración de la riqueza y a la formación de una oligarquía.

Para entender cómo sucede eso, supongamos que estamos en un casino y nos invitan a tomar parte en un juego. Debemos depositar sobre la mesa una apuesta inicial de 100 euros, y entonces se lanza una moneda al aire. Si sale cara, ganaremos el 20 por ciento de lo que hay en la mesa, de modo que acabaremos con 120 euros. Pero si sale cruz, la casa se llevará el 17 por ciento y nos quedarán 83 euros. Podemos mantener el dinero en la mesa durante tantos lanzamientos de moneda como queramos, sin añadir ni retirar nada. En cada ronda ganaremos el 20 por ciento de lo que hay sobre la mesa si sale cara y perderemos el 17 por ciento si sale cruz. ¿Deberíamos jugar?

Para decidirlo es posible esgrimir dos argumentos, ambos persuasivos. Podemos pensar: hay una probabilidad ½ de ganar 20 euros y una probabilidad ½ de perder 17 euros. Por lo tanto, la ganancia esperada

$$\tfrac{1}{2} \times (+20\ €) + \tfrac{1}{2} \times (-17\ €) = 1{,}50\ €$$

es positiva. Dicho de otra forma, las probabilidades de ganar y perder son las mismas, pero la ganancia si ganamos es mayor que la pérdida si perdemos. Desde esta perspectiva, parece ventajoso participar en el juego.

O podríamos ir más allá, como hacen los ajedrecistas: ¿qué ocurre si jugamos 10 rondas? Un resultado probable es que salgan cinco caras y cinco cruces. Cada vez que sale cara, nuestra apuesta se multiplica por 1,2. Cada vez que sale cruz, por 0,83. Tras ganar cinco veces y perder otras cinco (en cualquier orden), en la mesa quedarán

$$1{,}2 \times 1{,}2 \times 1{,}2 \times 1{,}2 \times 1{,}2 \times 0{,}83 \times 0{,}83 \times 0{,}83 \times 0{,}83 \times 0{,}83 \times 100\ € = 98{,}02\ €,$$

así que perderíamos unos 2 € de nuestra apuesta inicial de 100 €. Con un poco más de trabajo, podemos confirmar que necesitaríamos unas 93 rondas ganadoras para compensar 91 derrotas. Desde esta óptica, no parece conveniente jugar.

La contradicción entre estos dos argumentos puede parecer sorprendente a primera vista, pero es bien conocida en probabilidad y finanzas. Sin embargo, su conexión con la desigualdad en la distribución de la riqueza no lo es tanto. Para extender la metáfora del casino al movimiento de riqueza en una economía (extremadamente simplificada), imaginemos a 1000 individuos que realizan transacciones por parejas. Cada uno comienza con una cierta riqueza, que puede ser la misma para todos. Elegimos dos agentes al azar para que lleven a cabo una transacción, luego hacemos lo mismo con otros dos, y así sucesivamente. Es decir, el modelo supone transacciones secuenciales entre parejas de agentes elegidos al azar. Nuestro plan es completar millones o miles de millones de tales transacciones en nuestra población de 1000 personas y observar cómo acaba distribuida la riqueza.

¿Cómo sería una transacción entre un par de agentes? Dado que la gente muestra una aversión natural a arruinarse, supondremos que la cantidad que hay en juego (Δw, «delta de w») es una fracción de la riqueza de la persona más pobre, a la que llamaremos Shauna. Así, incluso si Shauna sale perdiendo en una transacción con Eric, la persona más rica, la cantidad que pierde siempre es menor que su riqueza total. Es una suposición razonable y, de hecho, refleja una limitación que casi todos nos autoimponemos de manera instintiva en nuestra vida económica. Para empezar, supongamos —simplemente porque los números nos resultan familiares— que Δw es el 20 por ciento de la riqueza de Shauna (w) si esta gana y el –17 por ciento de w si pierde. (En nuestro modelo real, los porcentajes son los mismos al ganar y al perder, pero eso no altera el resultado final. Además, aumentar o disminuir Δw solo afecta al número de transacciones requeridas para alcanzar dicho resultado.)

Si nuestro objetivo es modelizar una economía de mercado justa y estable, deberíamos comenzar asumiendo que nadie tiene ninguna ventaja, así que decidiremos en qué dirección se mueve Δw lanzando una moneda al aire. Si sale cara, Shauna obtiene el 20 por ciento de su propia riqueza de manos de Eric; si sale cruz, debe entregarle a este el 17 por ciento de su riqueza. Ahora elijamos al azar otro par de agentes del total de 1000 y hagamos lo mismo. Y así un millón o mil millones de veces. ¿Qué ocurrirá?

EL MODELO DE LA VENTA DE SEGUNDA MANO

Ganadores y perdedores

El sencillo modelo matemático de la venta de segunda mano (*yard-sale model*), desarrollado por el físico Anirban Chakraborti, asume que la riqueza pasa de una persona a otra cuando la primera comete un «error» en una transacción económica. Si la cantidad pagada por un objeto coincide exactamente con su valor, la riqueza no cambia de manos. Pero si el comprador paga más de la cuenta o el vendedor acepta menos de lo que vale el artículo, se transfiere riqueza entre ellos. Como nadie quiere arruinarse, Chakraborti supuso que la cantidad que se podía perder era una fracción de la riqueza de la persona más pobre. Halló que el modelo conduce a una situación de desigualdad extrema: incluso si el resultado de cada transacción se decide mediante el lanzamiento de una moneda justa, tras muchas compras y ventas la riqueza acabará inevitablemente en los bolsillos de una única persona.



BROWN BIRD DESIGN

Si simulamos esta economía, una variante del modelo de la venta de segunda mano, observaremos algo notable: tras un gran número de transacciones, un único agente termina convertido en un «oligarca» que acapara casi toda la riqueza y los otros 999 acaban prácticamente en la ruina. No importa con qué riqueza comience cada uno, que todos los lanzamientos de moneda sean completamente justos o que el resultado esperado en cada transacción sea positivo para el agente más pobre y negativo para el más rico. En esta economía, cualquier agente podría convertirse en el oligarca: todos tienen las mismas probabilidades si empiezan con la misma riqueza. En ese sentido, hay igualdad de oportunidades. Pero solo uno de ellos lo logrará, mientras que todos los demás verán cómo su riqueza media tiende a cero a medida que realizan más y más transacciones. Para colmo de males, cuanto peor situado esté el agente en el escalafón de la riqueza, más rápida será la disminución.

Este resultado es especialmente sorprendente porque se alcanza incluso si todos los agentes comienzan con la misma riqueza y son tratados de manera simétrica. Los físicos se refieren a los fenómenos de este tipo como «rupturas de simetría» (*véase el recuadro* «La física de la desigualdad»). El primer lanzamiento de moneda transfiere dinero de un agente a otro, creando un desequilibrio entre ambos. Y una vez que aparece una diferencia de riqueza, por pequeña que sea, las sucesivas transacciones producirán un «goteo» sistemático de riqueza desde los agentes más pobres a los más ricos, acrecentando la desigualdad hasta llegar a una oligarquía.

Si la economía es desigual ya de entrada, la riqueza del agente más pobre será probablemente la que más rápido disminuya. ¿A dónde va a parar? Necesariamente a agentes más ricos, porque no hay ninguno más pobre. La situación del segundo agente más pobre no es mucho más halagüeña. A la larga, la riqueza de todos los participantes en esta economía decaerá exponencialmente, excepto la del más rico. En 2015, un artículo de mi grupo en la Universidad Tufts y otro de Christophe Chorro, de la Universidad Panteón-Sorbona de París, proporcionaron pruebas matemáticas del resultado que habían arrojado las simulaciones de Chakraborti: que el modelo de la venta de segunda mano transfiere la riqueza inexorablemente de un lado a otro.

¿Significa eso que los agentes más pobres nunca ganan o que los más ricos nunca pierden? Obviamente, no. La situación recuerda de nuevo a un casino: unas veces se gana y otras se pierde, pero cuanto más tiempo permanezcamos en el casino, más probable será que perdamos. Y el mercado libre es como un casino que no podemos abandonar. El goteo de riqueza que fluye de pobres a ricos en cada transacción deviene un torrente cuando se multiplica por 7700 millones de personas que completan innumerables transacciones alrededor del mundo cada año. La desigualdad se acentúa debido a los efectos colectivos de enormes cantidades de transacciones aparentemente inocuas pero sutilmente sesgadas.

La tendencia innata de la riqueza es fluir hacia los más ricos, de modo que la distribución «natural» de la riqueza en una economía de libre mercado es una oligarquía absoluta



LA CONCENTRACIÓN DE LA RIQUEZA

Por supuesto, cabe preguntarse si este modelo tiene algo que ver con la realidad. Después de todo, describe una economía inestable que aboca inevitablemente a una oligarquía absoluta, y en el mundo no existen tales oligarquías. Es cierto que, por sí solo, el modelo de la venta de segunda mano no puede explicar las distribuciones de riqueza que observamos. Por ello, mi grupo mejoró tres aspectos del modelo para hacerlo más realista.

En 2017, Adrian Devitt-Lee, Merek Johnson, Jie Li, Jeremy Marcq, Hongyan Wang y yo mismo, todos de la Universidad Tufts, incorporamos al modelo la redistribución de riqueza. Por simplicidad, lo que impusimos es que cada agente diera un paso hacia la riqueza media de la sociedad después de cada transacción. El tamaño de ese paso es una fracción χ («ji») de su distancia a la media. Esto equivale a un impuesto fijo sobre el patrimonio de los agentes ricos (con tasa impositiva χ por unidad de tiempo) y un subsidio para los pobres. Su efecto es transferir riqueza de las personas que están por encima de la media a quienes están por debajo. Descubrimos que esta sencilla modificación estabilizaba la distribución de la

EL COEFICIENTE DE GINI

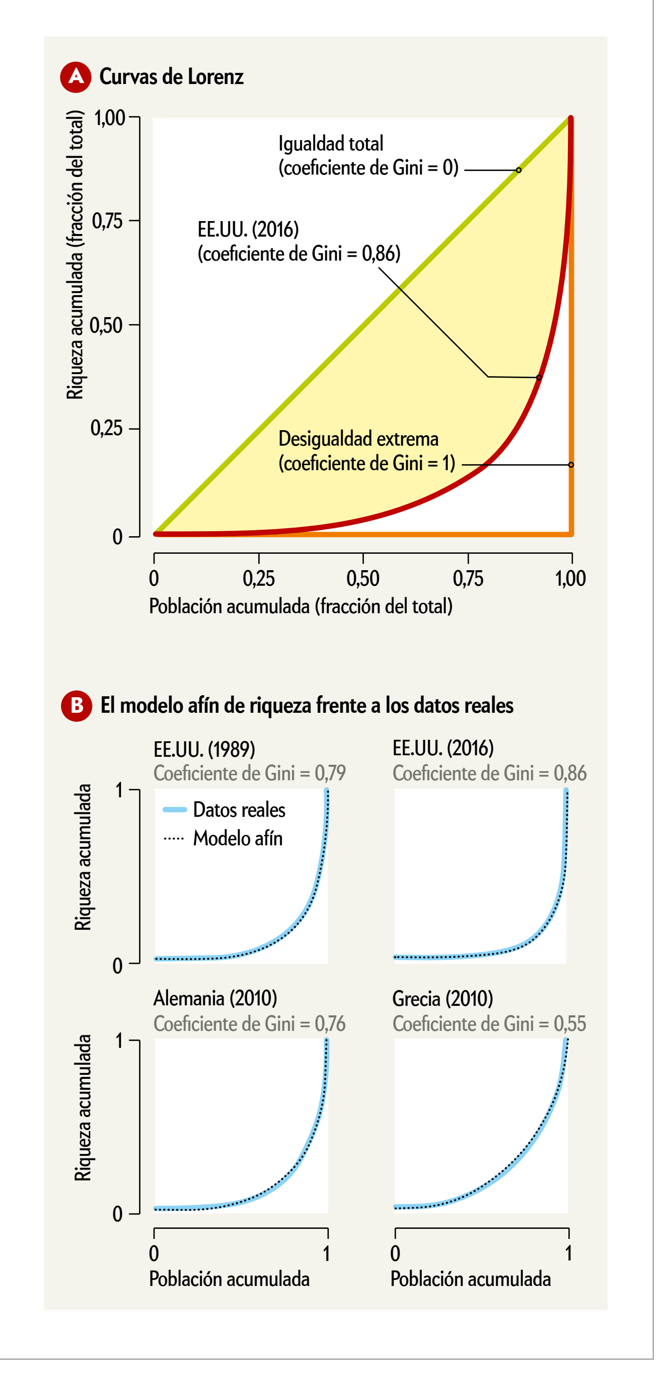
Medir la desigualdad

A principios del siglo XX, el economista estadounidense Max O. Lorenz concibió una manera práctica de cuantificar la desigualdad en la distribución de la riqueza. Propuso representar la fracción de riqueza acumulada por las personas con un patrimonio menor que *w* frente a la fracción de personas con un patrimonio menor que *w*. Puesto que ambas cantidades varían entre cero y uno, la gráfica encaja en un cuadrado de lado uno. El doble del área delimitada por la curva de Lorenz y la diagonal se denomina coeficiente de Gini, y constituye una medida muy común de la desigualdad [*véase* «Medir la desigualdad», por Juan M. R. Parrondo; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2006].

Si todo el mundo es igual de rico, cualquier fracción de la población posee precisamente esa misma fracción de la riqueza total. Por lo tanto, la curva de Lorenz es la diagonal (*línea verde en* A) y el coeficiente de Gini es cero. En cambio, si un oligarca acapara toda la riqueza, la fracción *f* más pobre de la población no posee nada para cualquier valor de *f* menor que uno y la curva de Lorenz no se despega del cero. Pero cuando *f* vale uno, el oligarca queda incluido y la curva salta abruptamente a uno. El área entre esta curva de Lorenz (*línea naranja*) y la diagonal es la mitad del área del cuadrado (½), por lo que el coeficiente de Gini es uno.

En suma, el coeficiente de Gini puede variar entre cero (igualdad absoluta) y uno (oligarquía). Como cabía esperar, la realidad está entre ambos extremos. La línea roja muestra la curva de Lorenz correspondiente a la riqueza de EE.UU. en 2016, de acuerdo con los datos de la Encuesta Financiera de los Consumidores de la Reserva Federal. El doble del área (*amarillo*) entre esta curva y la diagonal es 0,86, uno de los mayores coeficientes de Gini del mundo desarrollado.

Las cuatro figuras en B comparan los resultados del modelo afín de riqueza con las curvas de Lorenz reales de EE.UU. en 1989 y 2016, y de Alemania y Grecia en 2010. Los datos provienen de la Reserva Federal (en el caso de EE.UU.) y del Banco Central Europeo (en el de Alemania y Grecia). La discrepancia entre el modelo y los datos es menor que un 0,2 por ciento para EE.UU. y que un 0,33 por ciento para los países europeos. El coeficiente de Gini de EE.UU. (*indicado en las gráficas*) creció entre 1989 y 2016, lo que refleja un aumento de la desigualdad.



FUENTES: «ENCUESTA FINANCIERA DE LOS CONSUMIDORES», RESERVA FEDERAL (*datos de EE.UU.*); BANCO CENTRAL EUROPEO (*datos de Alemania y Grecia*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficas*)

riqueza, de modo que ya no se alcanzaba una oligarquía. Y, sorprendentemente, permitió que el modelo reprodujese los datos de la distribución de la riqueza en EE.UU. y Europa entre 1989 y 2016 con un error de menos del 2 por ciento. El parámetro χ parece aglutinar el efecto de una enorme variedad de impuestos y subsidios del mundo real que no es posible incluir por separado en un modelo tan esquemático como este.

Además, está comprobado que los ricos disfrutan de ventajas económicas sistémicas (como préstamos a tipos de interés más bajos o mejor asesoramiento financiero), mientras que a los pobres les ocurre justo lo contrario: se enfrentan a inconvenientes como la necesidad de recurrir a empresas de crédito rápido o la falta de tiempo para comprar al mejor precio. Como observó el escritor y activista James Baldwin, «cualquiera que haya lidiado con la pobreza sabe lo extremadamente caro que resulta ser pobre». En consecuencia, en nuestro trabajo también consideramos una ventaja asociada a la riqueza: un sesgo a favor del individuo más rico en el lanzamiento de la moneda. Dicho sesgo es proporcional a un nuevo parámetro, ζ («dseta»), multiplicado por la diferencia de riqueza entre los dos agentes y dividido por la riqueza media de la sociedad. Gracias a esta simple mejora, que refleja la multitud de privilegios que disfrutan los ricos, el modelo reprodujo mejor la parte alta de las distribuciones reales de riqueza.

La inclusión de este sesgo relacionado con la riqueza también produce el fenómeno de la «oligarquía parcial» y proporciona una definición precisa del mismo. Siempre que la ventaja asociada a la riqueza tenga mayor impacto que la redistribución (cuando ζ es mayor que χ), una fracción muy pequeña de personas poseerá un porcentaje finito (1 – χ/ζ) de la riqueza de la sociedad. De hecho, la aparición de la oligarquía parcial constituye una transición de fase en otro modelo de transacciones económicas, como apuntaron en el año 2000 los físicos Jean-Philippe Bouchaud, ahora en la Escuela Politécnica de Francia, y Marc Mézard, de la Escuela Normal Superior de París. En nuestro modelo, cuando ζ es menor que χ, el sistema tiene un único estado estable sin oligarquía. Pero cuando ζ es mayor que χ, aparece un nuevo estado oligárquico que pasa a ser el estado estable (*véase el recuadro* «La física de la desigualdad»). La extensión del modelo de la venta de segunda mano que resulta de añadir los parámetros χ y ζ logra reproducir los datos de la distribución de la riqueza en EE.UU. y Europa entre 1989 y 2016 con errores de entre el 1 y el 2 por ciento.

Esa transición de fase podría haber desempeñado un papel crucial en la concentración de la riqueza tras la desintegración de la Unión Soviética en 1991. La imposición de una «terapia de choque» económica en los antiguos estados de la URSS produjo una drástica reducción de la redistribución de riqueza por parte de sus Gobiernos (es decir, una disminución de χ) y un salto simultáneo de la ventaja asociada a la riqueza (un aumento de ζ) debido al efecto combinado de la privatización y la desregulación repentinas. La consiguiente bajada de la «temperatura» χ/ζ precipitó a estos países anteriormente comunistas a un estado de concentración de la riqueza, convirtiéndolos en oligarquías parciales casi de la noche a la mañana. A día de hoy, al menos 10 de las 15 exrepúblicas soviéticas pueden describirse como oligarquías.

Como tercera mejora, en 2019 incluimos en nuestro modelo la posibilidad de poseer riqueza negativa, uno de los aspectos más inquietantes de las economías modernas. En 2016, por ejemplo, alrededor del 10,5 por ciento de la población de Estados Unidos tenía deudas netas debido a hipotecas, préstamos estudiantiles y otros factores. Así que introdujimos un tercer parámetro, κ («kappa»), que desplaza la distribución de la riqueza hacia abajo y permite dar cuenta de la riqueza negativa. Supusimos que el agente más pobre nunca puede tener una riqueza menor que –*S*, con *S* igual a κ veces la riqueza media. Antes de cada transacción se le presta una cantidad *S* a cada agente para que ninguno tenga riqueza negativa. Entonces hacen negocios de acuerdo con la extensión del modelo de la venta de segunda mano descrita anteriormente, tras lo cual ambos devuelven la cantidad *S*.

El resultado de estas mejoras es el modelo afín de riqueza, un modelo con tres parámetros (χ, ζ, κ) capaz de reproducir los datos reales de la distribución de la riqueza en EE.UU. a lo largo de tres décadas con un error inferior al 0,17 por ciento. En matemáticas, la palabra *afín* describe una transformación que combina un incremento multiplicativo y una traslación aditiva. En este caso, algunas características del modelo, como el valor de Δ*w*, aumentan de manera multiplicativa con la riqueza del agente, mientras que otras, como la suma o resta de *S*, constituyen traslaciones o desplazamientos aditivos en el «espacio de riqueza». Típicamente, el modelo describe la distribución real de riqueza de los países europeos en 2010 con errores máximos de entre un tercio y la mitad de un punto porcentual (*véase el recuadro* «Medir la desigualdad»).

Para llevar a cabo estas comparaciones con los datos reales, tuvimos que resolver el «problema inverso»: encontrar los valores de (χ, ζ, κ) para los que nuestro modelo concuerda mejor con una determinada distribución empírica de la riqueza. Por ejemplo, los valores χ = 0,036, ζ = 0,050 y κ = 0,058 son los que mejor describen la distribución de la riqueza de los hogares de EE.UU. en 2016. El modelo afín de riqueza se ha contrastado con datos reales de muchos países y épocas y, hasta donde sabemos, los describe con mayor precisión que ningún otro.

TRANSICIONES DE FASE

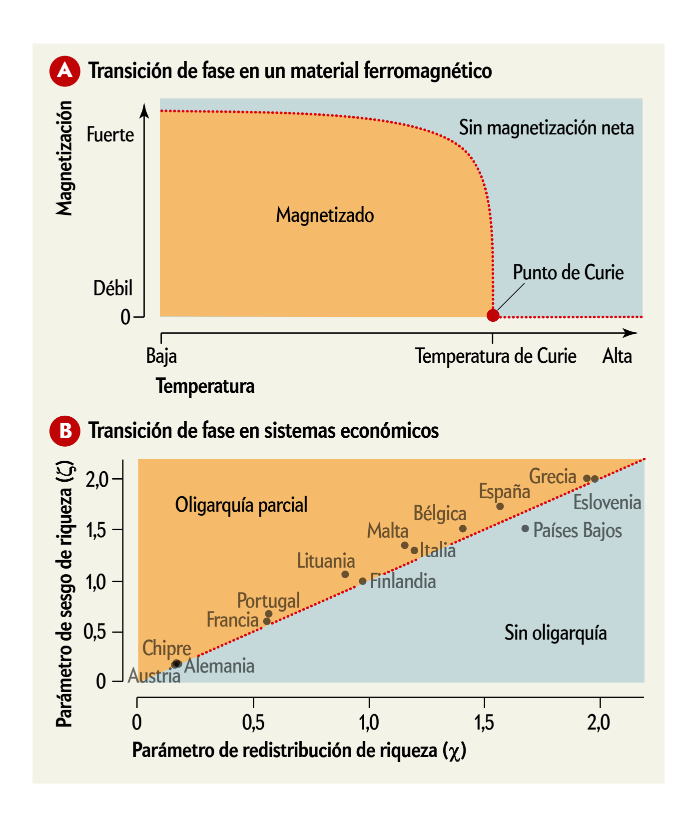
La física de la desigualdad

Cuando el agua hierve a 100 grados Celsius y se transforma en vapor, experimenta una transición de fase: un cambio brusco y drástico. Por ejemplo, su volumen (a una determinada presión) aumenta de manera discontinua con la temperatura. De modo similar, la magnetización de un material ferromagnético cae a cero (*línea naranja en* A) cuando alcanza la «temperatura de Curie» (T_C), por encima de la cual la sustancia no presenta magnetización neta. La reducción de la magnetización es continua a medida que la temperatura aumenta hasta T_C, pero la gráfica de la magnetización frente a la temperatura presenta un pico para ese valor.

También ocurre a la inversa: cuando la temperatura de un material ferromagnético cae por debajo de T_C, aparece espontáneamente una magnetización. Cabe preguntarse en qué dirección lo hace, puesto que la magnetización posee una orientación espacial intrínseca: la dirección que va del polo sur al polo norte del imán. En ausencia de un campo magnético externo que defina una dirección privilegiada, la ruptura de la simetría rotacional es «espontánea» (a temperaturas mayores que T_C el sistema tiene simetría rotacional; esto es, presenta el mismo aspecto lo miremos desde donde lo miremos). Por tanto, la magnetización aparece de repente y en una dirección aleatoria. (Siendo más precisos, la dirección depende de fluctuaciones microscópicas que van más allá de nuestra visión idealizada de los materiales ferromagnéticos como sistemas macroscópicos continuos.)

Los sistemas económicos también pueden presentar transiciones de fase. En el modelo afín de riqueza, cuando el parámetro de sesgo de riqueza (ζ) es menor que el de redistribución (χ), la distribución de la riqueza no es oligárquica, ni siquiera en parte (*área azul en* B). Pero si ζ es mayor que χ, un porcentaje finito de la riqueza de la población se concentra en los bolsillos de una fracción infinitesimal de agentes ricos. El cociente χ/ζ desempeña el papel de la temperatura y la concentración de la riqueza aparece cuando esa cantidad cae por debajo de uno.

Otra simetría sutil que exhiben los sistemas macroscópicos complejos es la «dualidad», que describe una biyección entre estados de una sustancia por encima y por debajo de la temperatura crítica a la que ocurre la transición de fase. En el caso del ferromagnetismo, relaciona un estado ordenado y magnetizado a una temperatura *T* menor que T_C con su «dual», un estado desordenado y sin magnetización a la «temperatura inversa» T_C^2/T, mayor que T_C. La temperatura crítica es donde se cruzan la temperatura del sistema y la temperatura inversa (es decir, $T = T_C^2/T$). En



los últimos años, estas relaciones de dualidad entre sistemas físicamente distintos han ganado relevancia en física teórica.

El modelo afín de riqueza también muestra dualidad, como demostramos Jie Li y quien escribe estas líneas en 2018. Un estado con $\zeta < \chi$ no es una oligarquía parcial, mientras que uno con esta relación invertida (es decir, con la «temperatura» χ/ζ invertida a ζ/χ) sí lo es. Curiosamente, estos dos estados duales presentan exactamente la misma distribución de riqueza si eliminamos al oligarca de la economía donde la riqueza está concentrada (y se recalcula la riqueza total para tener en cuenta su ausencia).

Muchas naciones están cerca de la transición. La gráfica B muestra la posición en el plano χ-ζ de 14 países de la zona euro. Todos menos uno (Países Bajos) están justo por encima de la diagonal, lo cual indica que se encuentran en una situación ligeramente oligárquica. Quizá la desigualdad crece de manera natural hasta que comienzan a formarse oligarquías, momento en el que las presiones políticas evitan que siga aumentando.

FUENTES: BRUCE M. BOGHOSIAN; BANCO CENTRAL EUROPEO (*datos de los países*)

GOTEO ASCENDENTE

No deja de ser curioso que el modelo que mejor reproduce la distribución real de la riqueza sea uno que resultaría completamente inestable sin la redistribución de riqueza, en vez de uno basado en un supuesto equilibrio entre las fuerzas del mercado. De hecho, estos modelos matemáticos demuestran que la tendencia innata de la riqueza es fluir hacia los más ricos, de modo que la distribución «natural» de la riqueza en una economía de libre mercado es una oligarquía absoluta. La redistribución es lo único que impone límites a la desigualdad.

Los modelos también ponen de relieve que la distribución de la riqueza es en gran medida el resultado de la ruptura de simetría, la casualidad y las ventajas iniciales (por ejemplo, provenientes de una herencia). Y la presencia de la ruptura de simetría desmonta los argumentos que defienden la justicia de la distribución desigual de la riqueza apelando a la «voluntariedad» (la noción de que los individuos son totalmente responsables de su situación económica simplemente porque realizan las transacciones de manera voluntaria) o a la idea de que la acumulación de riqueza es consecuencia de la inteligencia y el trabajo duro. Es cierto que la posición de un individuo en el escalafón de la riqueza está relacionada en cierta medida con esos atributos. Pero la forma general de la distribución puede explicarse (con un error inferior al 0,33 por ciento) mediante un modelo estadístico que los ignora por completo. La suerte tiene mucha más importancia de la que solemos concederle, de modo que la virtud y el estigma que normalmente asociamos a la riqueza y a la pobreza en las sociedades modernas carecen de justificación.

Además, la tendencia natural de la riqueza a fluir desde los pobres a los ricos en una economía de mercado solo puede compensarse mediante un mecanismo de redistribución cuidadosamente diseñado. La redistribución a menudo se confunde con los impuestos, pero es un concepto muy diferente. Los impuestos pasan de las personas a sus Gobiernos y sirven para financiar las actividades de estos. La redistribución (aunque puedan implementarla los Gobiernos) es más bien un flujo de riqueza entre personas que compensa la injusticia inherente a la economía de mercado. En un esquema de redistribución fija, todos aquellos con una riqueza inferior a la media recibirían fondos netos, mientras que los que se situasen por encima de la media deberían aportarlos. Y, dada la situación actual de extrema desigualdad, la mayoría de la gente recibiría dinero.

En vista de lo complicadas que son las economías reales, resulta gratificante que un sencillo método analítico desarrollado por físicos y matemáticos sea capaz de describir las distribuciones de riqueza de múltiples naciones con una precisión y exactitud sin precedentes. También resulta bastante curioso que dichas distribuciones muestren características sutiles, pero esenciales, de los sistemas físicos complejos. Sin embargo, lo más importante es el hecho de que un esbozo del mercado libre tan simple y plausible como el modelo afín de riqueza dé lugar a economías que son cualquier cosa menos libres y justas. Eso debería constituir tanto un motivo de alarma como una llamada a la acción.

PARA SABER MÁS

A nonstandard description of wealth concentration in large-scale economies. Adrian Devitt-Lee et al. en *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 78, n.º 2, pags. 996-1008, marzo de 2018.

The affine wealth model: An agent-based model of asset exchange that allows for negative-wealth agents and its empirical validation. Jie Li et al. en *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, vol. 516, págs. 423-442, febrero de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Modelos matemáticos de la riqueza. Ricardo López Ruiz y Carmen Pellicer Lostao en *IyC*, marzo de 2011.

La amenaza de la desigualdad. Angus Deaton en *IyC*, noviembre de 2016.

La desigualdad en EE.UU. Joseph E. Stiglitz en *IyC*, enero de 2019.

BUSCANDO VIDA

La exploración del desierto realizada a lo largo de los últimos quince años ha llevado al descubrimiento de vida microbiana en lugares insospechados que se hallan en el límite de la habitabilidad



MARÍA ELENA SUR, en el desierto de Atacama, es el lugar de la Tierra más seco y más parecido a Marte. Aquí la vida microbiana es tan escasa que los investigadores deben emplear trajes esterilizados para no contaminar las muestras que toman del suelo.

EN EL ATACAMA

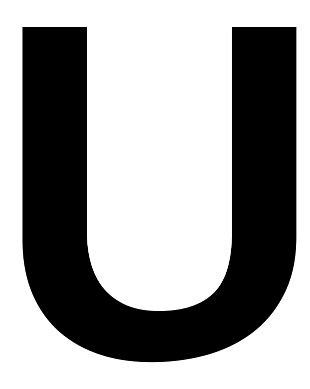
Armando Azúa-Bustos y Carlos González-Silva



Armando Azúa Bustos es investigador del Departamento de Planetología y Habitabilidad del Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), en Madrid. Investiga la estrecha relación entre el agua y la vida en la Tierra como punto de partida para buscar indicios de vida en otros lugares del sistema solar.



Carlos González Silva es investigador de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Tarapacá, en Chile. Su principal tema de estudio es la microbiología de los ambientes hiperáridos.



Uno de nosotros (Azúa Bustos), conoce especialmente bien este increíble lugar, ya que nació y vivió durante más de veinte años en él. Su pueblo natal, Pedro de Valdivia, es ahora, como tantas otras en esta región, una aldea minera abandonada. Está situada en el valle central del desierto chileno de Atacama, conocido como el núcleo hiperárido, un lugar tan seco que hasta donde alcanza la vista en el horizonte no se ve ni una sola forma de vida. Nada, ni la más mínima brizna de hierba.

¿Realmente no hay vida en absoluto? Según el científico Ian Malcolm, personaje de la película *Jurassic Park*, «la vida siempre se abre camino». En el Atacama hemos comprobado que, en efecto, es así, aunque para poder observarla se necesita un microscopio. Durante los últimos quince años, hemos llevado a cabo duras expediciones de campo movidos por el afán de descubrir indicios de vida en uno de los lugares más secos e inhóspitos de la Tierra.

Cuando emprendimos nuestras investigaciones nos planteamos una pregunta principal: ¿cuál es el tipo de ambiente más árido en el que puede desarrollarse la vida? Responder a esta cuestión no solo reviste interés en sí mismo, sino que puede orientar la búsqueda de vida en Marte.

En 2007, la NASA definió la estrategia *Follow the water* («Seguir la pista del agua») como una forma de buscar posibles indicios de vida en el planeta rojo. Dado que toda la vida en la Tierra depende del agua para subsistir, descubrir las circunstancias y los ambientes terrestres más secos en los que esta prolifera puede ofrecernos pistas sobre qué entornos parecidos en Marte debemos explorar para encontrar posibles pruebas de vida actual o pasada. El Atacama constituye uno de los mejores lugares en la Tierra para realizar estudios en un ambiente análogo al de Marte. De hecho, la escasez extrema de agua es la razón principal por la que muchos de los instrumentos y robots ya enviados o que se planean enviar al planeta en distintas misiones se ensayen primero en este desierto.

A raíz de la pertinaz búsqueda de vida en el Atacama, nuestro equipo ha aprendido cómo esta halla las estrategias más ingeniosas y sorprendentes para adaptarse a las duras condiciones que suponen la práctica ausencia de lluvias, el predominio de suelos altamente salinos y la elevada radiación solar. Los hallazgos nos ofrecen un atisbo sobre lo que pudo ocurrir con el agua en Marte, así como el destino que habría sufrido una posible biosfera marciana primordial.

ESCASEZ DE AGUA

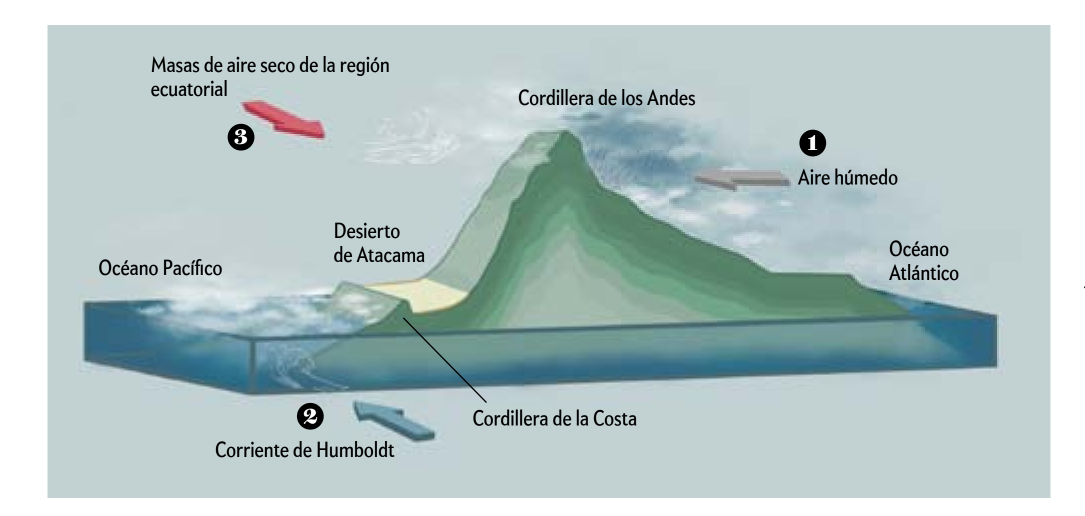
Varios factores explican la extrema aridez del Atacama, en cuyo núcleo hiperárido llueven, en el mejor de los casos, 2 litros por metro cuadrado al año. Por un lado, el aire húmedo de los valles amazónicos situados al este del desierto choca con la cordillera de los Andes (cuya altura supera allí los 6000 metros) y descarga toda la lluvia en la vertiente oriental; por tanto, cuando llega a la vertiente occidental (donde se sitúa el desierto) apenas contiene humedad. Es lo que se conoce como «sombra de lluvia» o efecto Föhn. Por otra parte, las aguas frías de la corriente de Humboldt, que ascienden desde el polo sur en dirección al ecuador y bañan las costas de Chile, presentan una escasa evaporación en esta zona. Las pocas nubes (más bien neblinas) que se forman frente al Atacama son detenidas por la cordillera de la Costa (cuya altura varía entre unos 1000 y 3000 metros, aproximadamente), que bordea el desierto en la parte occidental. Finalmente, las grandes masas de aire húme-

EN SÍNTESIS

La aridez y las condiciones extremas del desierto de Atacama lo convierten en un lugar idóneo para estudiar los límites para la existencia de la vida en nuestro planeta. Ese conocimiento, de interés científico en sí mismo, puede además orientar la búsqueda de vida en Marte.

En los últimos decenios, las campañas de campo en el desierto y los estudios de laboratorio han permitido descubrir formas de vida microbiana en lugares insospechados, como fondos de cuevas, telarañas y fragmentos de cuarzo.

En esos ambientes se ha descrito una gran diversidad de especies, entre ellas microalgas, bacterias y arqueas, que logran sobrevivir con una cantidad mínima de agua aprovechable.



¿POR QUÉ ES TAN SECO EL ATACAMA?: Las nubes originadas en el Atlántico descargan sobre la vertiente oriental de los Andes y no llegan al desierto ❶; la corriente de Humboldt, procedente de la Antártida, enfría las aguas del Pacífico, y las escasas neblinas que se forman sobre ellas no logran atravesar la cordillera de la Costa ❷; las masas de aire húmedo del ecuador que descargan sobre los bosques lluviosos se desplazan hacia el sur y llegan, ya sin agua, al Atacama ❸.

do de las regiones ecuatoriales, tras descargar sobre los extensos bosques lluviosos de esta zona, suben en la atmósfera para volver a descender, ya sin agua, justo en la latitud en la que se ubica el desierto. Todos esos factores constituyen la ecuación perfecta que condena a esta región a ser la más seca del planeta.

El desierto de Atacama es, además, el más antiguo de la Tierra. Se estima que ha sido un lugar árido en los últimos 150 millones de años, e hiperárido, tal como lo conocemos hoy, en los últimos 15 millones de años. Esto se debe a que, en el proceso de deriva continental, la placa sudamericana se mantuvo más o menos en la misma latitud, al contrario que las otras placas, que experimentaron grandes desplazamientos. Como consecuencia, los condicionantes climáticos antes explicados se han mantenido más o menos constantes desde el tiempo en que los dinosaurios reinaron la Tierra.

Como si los dioses se hubieran ensañado particularmente con esta zona, el Atacama es la región del mundo donde incide una mayor cantidad de radiación ultravioleta. En parte a causa de estos, los suelos contienen una variedad de compuestos altamente oxidantes, entre ellos varias sales de percloratos, que acaban con cualquier iniciativa de colonización biológica. Como consecuencia de estas condiciones extremas, el desierto es considerado uno de los mejores modelos análogos de Marte en la Tierra.

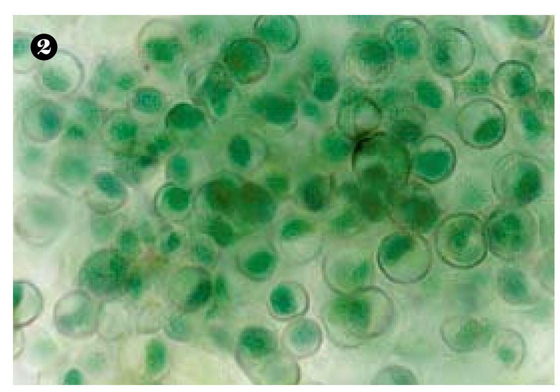
UN REFUGIO EN LAS CUEVAS

Con el propósito de descubrir alguna forma de vida en el desierto, comenzamos a explorar la zona limítrofe con la cordillera de la Costa. Sabíamos que, debido a la cercanía del océano Pacífico, en este lugar había un poco más de humedad disponible para la vida que en los valles hiperáridos situados más adentro.

Nuestros primeros descubrimientos los hicimos en cavernas de esta zona. Decidimos centrarnos en esos ambientes teniendo en mente las posibles circunstancias en las que podría haber existido vida en Marte. Planteamos la hipótesis de que, de haber surgido allí alguna vez, bien podría tratarse de microorganismos fotosintéticos (capaces de usar la luz solar como fuente de energía, al igual que las plantas), ya que estos figuran entre las formas de vida más antiguas halladas en el registro fósil de la Tierra.

Sin embargo, a diferencia de nuestro planeta, Marte no cuenta con una capa de ozono, lo que determina que toda la radiación ultravioleta (incluidos los letales rayos UVC) llegue sin impedimento a su superficie y destruya cualquier forma de vida. Si uno quisiera hallar vida fotosintética en el planeta rojo, tal vez podría encontrarla dentro de algunas de las cuevas que se han descrito allí. Uno podría imaginarse que tales microorganismos estarían ubicados lo suficientemente lejos de la entrada de la caverna como para no ser afectados por la radiación UV, pero a la vez lo bastante cerca de ella como para recibir un mínimo de luz

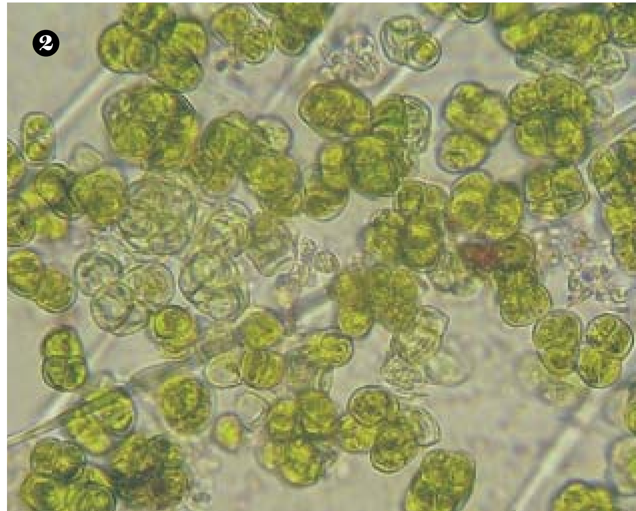




EN EL FONDO DE UNA CAVERNA de la cordillera de la Costa ❶ crece la microalga *Cyanidium* sp. Atacama ❷, que aprovecha la escasa luz del sol que llega hasta allí para hacer la fotosíntesis.

ARIADNA GEA (*infografía*)





EN LA ENTRADA DE ESTA CAVERNA de la cordillera de la Costa se descubrieron telarañas verdosas ❶. El estudio microscópico demostró la presencia de la microalga unicelular *Dunaliella atacamensis* (*verde*), que usaba las hebras de seda como soporte ❷.

(correspondiente, aproximadamente, al espectro visible) que le permita llevar a cabo la fotosíntesis.

Al adentrarnos en la primera caverna que exploramos en esta cordillera, cuando ya requeríamos de linternas para poder ver, nos fijamos en unas rocas que presentaban una coloración verdosa. Extrajimos muestras para estudiarlas más tarde en el laboratorio. Al examinarlas con un microscopio y someterlas a una serie de análisis genéticos, demostramos que se trataba de un nuevo tipo de microalgas pertenecientes al género *Cyanidium* (con células de una centésima de milímetro de tamaño). Descubrimos que estos microorganismos usaban el rocío marino como fuente de agua y que su coloración verdosa correspondía a la clorofila, pigmento que interviene en la fotosíntesis.

Era fascinante. La cantidad de luz solar que alcanzaba esas rocas era solo del 0,1 por ciento. Un valor extremadamente bajo para cualquier planta, pero suficiente para que esas microalgas realizaran la fotosíntesis sin ser dañadas por la radiación UV. El hallazgo confirmaba nuestra hipótesis sobre la posibilidad de encontrar microorganismos fotosintéticos en cavernas marcianas. Publicamos los resultados en *Microbial Ecology* en 2009.

En otra cueva de la cordillera, a escasa distancia de la entrada, también observamos algo verdoso. Pero en ese caso no eran rocas, sino telas de araña que cubrían las paredes. Tomamos muestras de estas telas verdes y, con la sospecha de que la coloración tal vez la confería la clorofila, continuamos nuestra ruta por el desierto. Pero ¿de qué modo las telarañas podrían propiciar el desarrollo de la vida?

SUPERFICIES QUE ATRAPAN AGUA

Una de las características del desierto de Atacama es que, por lo general, cualquier lugar habitado está al menos a 100 kilómetros de distancia, lo que da suficiente tiempo para pensar entre viaje y viaje. Cuando nos aproximábamos al hotel donde nos hospedábamos recordamos haber visto, en otra ocasión, telarañas a horas tempranas de la mañana: ¡estaban cubiertas de rocío! En efecto, comprobamos en la bibliografía científica que la seda es altamente higroscópica, es decir, tiene una gran capacidad de absorber agua.

Sabiendo que en la cordillera de la Costa las neblinas —conocidas por los lugareños como *camanchacas* (vocablo de origen aimara)— cubren regularmente esta zona durante la noche y las primeras horas de la mañana, planteamos la hipótesis de que aquello que cubría las telarañas crecía solo sobre ellas porque ahí contaba con una fuente regular de agua. En un viaje posterior a esa caverna, no a las tres de la tarde como la primera vez, sino a las cinco de la mañana, uno de nosotros (González Silva) se dio cuenta de que todas las telarañas presentaban pequeñas gotas de agua.

Al examinar bajo el microscopio las telas verdosas, comprobamos que se trataba de una microalga. El análisis genético reveló que correspondía a una nueva especie del género *Dunaliella*, un grupo de microalgas que consta de unas 25 especies. Sorprendentemente, todas las descritas con anterioridad medraban en medios acuáticos. La que descubrimos nosotros era la primera conocida con capacidad de crecer fuera del agua y, extrañamente, en el desierto más seco del mundo. Describimos el hallazgo en la revista *Extremophiles* en 2010.

Tras saber que el rocío marino y las neblinas costeras podían sustentar la vida en la cordillera de la Costa, comenzamos a explorar un poco más hacia el interior del desierto.

En ciertos sectores de la cordillera existen afloramientos de piedras de cuarzo. Si uno toma un fragmento y le da la vuelta, puede ver una coloración verde. Se trata, nuevamente, de clorofila. Obtuvimos muestras y las llevamos al laboratorio. Una inspección más acabada mostró que la parte inferior de estos cuarzos está colonizada por al menos unas ochenta especies de microorganismos pertenecientes a los tres dominios de la vida: arqueas, procariotas y eucariotas. Entre ellos había microalgas y cianobacterias (un tipo de bacterias con capacidad fotosintética) que contenían clorofila.

En un artículo publicado en *Microbial Ecology* en 2011, argumentamos que estos cuarzos actuaban como verdaderos «microinvernaderos»: el mineral es traslúcido a la luz solar, lo que permite que cianobacterias y microalgas situados bajo él lleven a cabo la fotosíntesis. Descubrimos, además, que durante buena parte del día los cuarzos se mantienen más fríos que el

suelo en donde están semienterrados. A ello se suma que las zonas donde se encuentran son humedecidas cada noche por las neblinas costeras. No fue extraño comprobar, por tanto, que, en su parte inferior, los cuarzos retuvieran más tiempo la humedad durante el día, lo que sin duda favorecía la colonización y la supervivencia de los microorganismos descritos.

Otro de los lugares donde podría refugiarse la vida en el Atacama son las arcillas, puesto que ofrecen un microambiente estable que siempre contiene agua líquida. De hecho, el estudio de las arcillas constituye un tema de extremo interés en Marte. Uno de los principales objetivos del vehículo explorador Curiosity, que ahora se halla en el cráter Gale de Marte, así como de los próximos vehículos que se enviarán al planeta (el Mars 2020, de la NASA, y el Rosalind Franklin, de la ESA), consiste en analizar un tipo de arcillas denominadas esmectitas. Puesto que las arcillas solo se forman cuando hay agua en abundancia, su presencia confirma que en Marte hubo bastante más agua líquida en el pasado que en la actualidad. Además, en la Tierra las arcillas (y las esmectitas en particular) tienen la capacidad de preservar varios tipos de bioseñales (componentes orgánicos, como lípidos y otras moléculas asociadas a los seres vivos). Si tales bioseñales se detectaran también en las arcillas marcianas, ello supondría una prueba sólida de la existencia de vida pasada o presente en el planeta rojo.

Actualmente, estamos inspeccionando lugares del Atacama que podrían albergar este tipo de arcillas. Si descubrimos que están habitadas por microorganismos, ello nos podría señalar el camino de cómo proseguir con la búsqueda de vida en Marte.

EL LUGAR MÁS SECO DE TODOS

Para continuar con nuestra búsqueda de cómo la vida se adapta a la falta de agua, emprendimos la exploración del valle central hiperárido del Atacama. Nos interesaba encontrar sitios tan secos que nada, ni siquiera la vida microbiana, pudiera sobrevivir en ellos. Para ello, Azúa Bustos hizo uso de la memoria e intentó recordar aquellos lugares en los que, de niño, nunca había visto nubes ni neblinas y en los que, además, el viento fuera recurrente. El viento es un potente movilizador de la humedad y extrae el agua del ambiente y de los seres vivos.

Localizamos tres lugares que cumplían con estas condiciones: Cerritos Bayos, Moctezuma y María Elena Sur. Colocamos en ellos microsensores ambientales para medir la humedad y la temperatura atmosférica y comparamos los datos con los obtenidos en Yungay, que hasta entonces había sido considerado el lugar más seco del Atacama, según habían descrito investigadores de la NASA en *Science* en 2003.

Después de analizar los datos de los sensores, comprobamos que, efectivamente, estas tres localizaciones eran mucho más secas que Yungay, siendo María Elena Sur la más seca de todas. Enterramos luego los sensores en el suelo de esa última zona para averiguar lo que sucedía a distintas profundidades. Sorprendentemente, descubrimos que a un metro de profundidad la humedad relativa era solo del 10 por ciento, un valor que, además, no variaba en el tiempo.

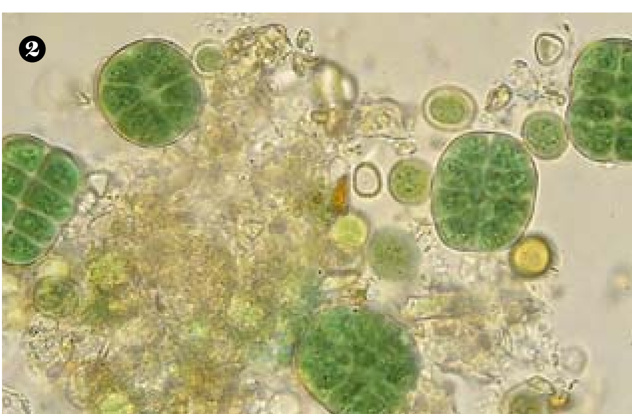
Aquí debemos comentar lo que significa una humedad relativa tan baja para la vida. La disponibilidad de agua para los procesos vivos se define a partir de la «actividad del agua». Este parámetro indica la cantidad de agua disponible para la vida en una determinada sustancia o ambiente. En un vaso de agua pura, esta se encuentra totalmente disponible para cualquier forma de vida, por lo que la actividad del agua es 1 (equivalente a 100 por cien de humedad relativa). Si comenzamos a agregar sal común (cloruro de sodio) al vaso, las moléculas de agua interaccionarán con las de la sal y la actividad del agua irá disminuyendo: las moléculas de agua se verán atraídas por los iones de cloro y sodio, por lo que cualquier forma de vida tendrá que vencer estas interacciones para poder aprovechar el agua. La mayoría de las formas de vida en la Tierra mueren o dejan de crecer en ambientes donde la actividad del agua es 0,9 o menor. Solo un par de levaduras sustentan el récord de vivir en medios con una actividad del agua de 0,6.

En 2015, describimos en *Environmental Microbiology Reports* que María Elena Sur era el lugar más seco de la Tierra y demostramos que lo era tanto o más que la superficie de Marte. Lo más sorprendente fue hallar algunas bacterias en sus suelos que sobrevivían con una actividad del agua de solo 0,1 (10 por ciento de humedad relativa), lo que sugiere que la extrema desecación no es una limitación para potenciales formas de vida microbiana en los suelos marcianos.

Y LLEGARON LAS LLUVIAS

Ese mismo año, conducíamos nuestro automóvil por los valles hiperáridos del desierto cuando comenzamos a observar lagunas a uno y otro lado del camino. Intrigados, nos apeamos para





UN FRAGMENTO DE CUARZO de la cordillera de la Costa muestra, en su cara inferior y bajo la superficie transparente del mineral, partes de color verde ❶ que corresponden a una variedad de microorganismos, según revela el examen bajo el microscopio ❷.



EN LOS ÚLTIMOS AÑOS han aparecido varias lagunas en las regiones hiperáridas del desierto como consecuencia de episodios lluviosos insólitos. Al contrario de lo que cabría esperar, el agua en abundancia ha terminado con una gran parte de los microorganismos del suelo de estas zonas.

tomar fotografías y concluimos que debían de ser producto de la actividad humana en algún lugar cercano, probablemente de la explotación minera, que es intensa en la zona. Si bien estábamos al tanto de que hacía un par de meses había caído una muy inusual lluvia en esta región, no imaginamos que ello guardara ninguna relación con las lagunas. Resultaba muy improbable que la escasa precipitación registrada (entre 20 y 40 litros por metro cuadrado) las hubiera generado; de haber sido así, tales lagunas no se habrían mantenido tanto tiempo en el desierto más seco del mundo. Sin darle más vueltas al asunto, regresamos al coche y continuamos nuestro camino.

Pero dos años más tarde, en 2017, observamos de nuevo estas lagunas en la región de Yungay, en el valle hiperárido. Esta vez sí sabíamos que habían sido originadas por un segundo evento de lluvias ocurrido en los días anteriores. Increíblemente, estas lagunas no se evaporaron hasta después de varios meses.

Las precipitaciones, por cierto, no son desconocidas en el desierto de Atacama. Cada verano, en la cordillera de los Andes, ubicada en el límite oriental del desierto, se da un fenómeno conocido como el «invierno altiplánico». Este tiene lugar cuando las masas de aire cargadas de humedad procedentes del Amazonas consiguen atravesar la cordillera de los Andes y provocan lluvias sobre ella y sobre la región altiplánica circundante, aunque no avanzan más allá ni alcanzan las zonas hiperáridas.

Sin embargo, el fenómeno que tuvo lugar en 2015 y 2017, y sorprendentemente, de nuevo en 2019, fue muy distinto al del invierno altiplánico. En las tres ocasiones, las grandes masas de aire húmedo entraron desde el océano Pacífico, y en el período invernal (el 2015 y el 2017), y desde el sur el 2019. Se cree que la distinta procedencia de las masas se debe a un inusual aumento de las temperaturas superficiales en el Pacífico, las cuales dieron lugar a una mayor evaporación y formación de nubes. Estas llegaron al valle central hiperárido y causaron las lluvias más abundantes registradas hasta entonces. Este nuevo fenómeno resulta preocupante y se estima que es uno de los tantos e inesperados efectos del calentamiento global. Las estadísticas muestran claramente que en la última década ha llovido más en el norte de Chile que nunca antes.

Teniendo en cuenta que las lagunas tardaron varios meses en evaporarse, uno se inclinaría a pensar que la llegada de agua a estas regiones tan áridas causaría el florecimiento de la vida. Pero, de modo asombroso, descubrimos que ocurría todo lo contrario. Lo comprobamos al comparar el número y el tipo de especies microbianas de las lagunas con los datos publicados de la misma zona antes de que se formaran las lagunas: el 70 por ciento de las especies del suelo no lograron adaptarse a las nuevas condiciones y habían desaparecido. Postulamos que las células microbianas se habían llenado de agua hasta reventar, como lo harían pequeños globos, un fenómeno conocido como choque osmótico.

Las especies que no sobrevivieron estaban exquisitamente adaptadas a las condiciones particulares del Atacama. Poseían una variedad de mecanismos moleculares para maximizar la eficiencia en la captura, retención y uso de la escasísima agua disponible. Planteamos la hipótesis de que morían porque, simplemente, carecían de los mecanismos necesarios para lidiar con una cantidad enorme y súbita de agua, la cual, además, era altamente salina. Esta hipótesis se ve fundamentada por dos observaciones. Primero, las pocas especies supervivientes se habían descrito antes en medios acuáticos hipersalinos (y, por tanto, ya contaban con los mecanismos de adaptación apropiados). Segundo, en el agua de las lagunas hallamos una variedad de biomoléculas remanentes de las especies que habían muerto por choque osmótico. En la actualidad, seguimos explorando el fenómeno de la llegada de estas lluvias y su impacto en las particulares formas de vida del desierto.

Nuestras investigaciones nos permiten concluir que, aunque el Atacama parece a primera vista un descampado sin mayor interés, esconde numerosos lugares en los que habitan una variedad de especies microbianas altamente adaptadas a la extrema desecación. Ello no solo ayuda a entender los límites de la vida en la Tierra, sino que, además, nos permite elucubrar sobre las características que podrían tener las potenciales formas de vida marcianas y, en especial, dónde deberíamos buscarlas. Nuestras investigaciones revelan lo frágiles que son estos antiguos ecosistemas a los cambios generados por la acción humana, y cómo incluso los ambientes más extremos y aparentemente despoblados de nuestro planeta esconden una rica biodiversidad que debe ser estudiada y protegida. IyC

PARA SABER MÁS

Mars-like soils in the Atacama desert, Chile, and the dry limit of microbial life. Rafael Navarro-González et al. en *Science*, vol. 302, págs. 1018-1021, noviembre de 2003.

Discovery and microbial content of the driest site of the hyperarid Atacama desert, Chile. Armando Azua-Bustos, Luis Caro-Lara y Rafael Vicuña en *Environmental Microbiology Reports*, vol. 7, n.º 3, págs. 388-394, junio de 2015.

Unprecedented rains decimate surface microbial communities in the hyperarid core of the Atacama desert. Armando Azua-Bustos et al. en *Scientific Reports*, vol. 8, art. 16706, noviembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Extremófilos. Michael T. Madigan y Barry L. Marrs en *IyC*, junio de 1997.

Microorganismos halófilos. Shiladitya DasSarma en *IyC*, julio de 2007.

¿Convivimos con microorganismos alienígenas? Paul Davies en *IyC*, febrero de 2008.

por Kate Wong

El rostro de un australopiteco

El hallazgo reciente de un cráneo podría redibujar la filogenia humana

Casi 25 años después de la descripción de los primeros vestigios fósiles de *Australopithecus anamensis*, parece haberle llegado la hora a este ancestro olvidado. Un equipo de investigadores que trabaja en Etiopía ha descubierto un cráneo casi entero de este primitivo miembro del grupo de los homininos, del que forma parte *Homo sapiens* y sus parientes extintos más cercanos. Datado en 3,8 millones de años, el espécimen revela el desconocido rostro de *A. anamensis*, que hasta ahora solo era conocido por las mandíbulas, la dentadura y otros fragmentos óseos. Los rasgos patentes de este nuevo hallazgo indican que nuestro árbol filogenético tal vez requiera una revisión.

Para algunos, *A. anamensis* es el hominino más antiguo, pues algunos de sus fósiles se remontan hasta hace 4,2 millones de años. Durante años ha ocupado una posición clave en el árbol como ancestro directo de *Australopithecus afarensis*, considerado en general como el antecesor del género *Homo*, al cual pertenecemos. En virtud de la antigüedad y de las características de los fósiles, los paleoantropólogos pensaban que *A. anamensis* dio origen a *A. afarensis* a través del proceso evolutivo de la anagénesis, por el cual una especie acaba transformándose en otra. El nuevo descubrimiento pone en entredicho esa teoría.

Yohannes Haile-Selassie, del Museo de Historia Natural de Cleveland, y sus colaboradores recuperaron el cráneo en el yacimiento de Woranso-Mille, en la región de Afar, al noreste de Etiopía. Los rasgos de los dientes y las mandíbulas lo vinculan con los fragmentos conocidos de *A. anamensis*. El fósil nos revela un individuo de rostro prognato, caninos largos y malares marcados; el cráneo está provisto de una cresta sagital que servía como anclaje a una robusta musculatura mandibular, así como de una cavidad craneana larga y angosta que acogía un cerebro del tamaño del de un chimpancé. Los descubridores sospechan que perteneció a un macho adulto.

Y es aquí donde podría echar por tierra las ideas establecidas: a raíz de la anatomía más completa observada en el cráneo recién descubierto, el equipo de Haile-Selassie afirma que un enigmático hueso frontal craneano de 3,9 millones de años hallado en el yacimiento de Belohdelie, en la misma región de Afar, pertenece a *A. afarensis*. De ser cierta esta suposición, *A. anamensis*, conocido a partir de fósiles que abarcan una horquilla de 4,2 a 3,8 millones de años, y *A. afarensis*, que al parecer vivió hace entre 3,9 y 3,0 millones de años, debieron de coincidir en Afar, por lo menos durante 100.000 años. Esa contemporaneidad significa que el primero no pudo surgir de la anagénesis del segundo. En lugar de ello, *A. afarensis* se habría escindido de *A. anamensis*, que siguió conviviendo durante un tiempo con su descendiente. Esta bifurcación evolutiva, llamada cladogénesis, aparece cuando una población de una especie queda aislada de otra y ambas siguen sendas divergentes.

Sin embargo, la hipótesis que antepone la cladogénesis a la anagénesis depende enteramente de ese hueso frontal de 3,9 millones de años de Belohdelie perteneciente a *A. afarensis*; ningún otro resto conocido de esta especie es tan antiguo. Y con solo otro frontal de *A. anamensis* con el que compararlo (el del nuevo fósil), no puede descartarse que otros individuos de esta especie pudieran haber tenido una frente similar a la de Belohdelie. Solo el descubrimiento de nuevos rostros fósiles resolverá la incógnita.

—Kate Wong es responsable de redacción de Scientific American *sobre evolución y ecología.*

FOTOGRAFÍA DE DALE OMORI Y LIZ RUSSELL; IMAGEN COMPUESTA DE LAS MANOS SOSTENIENDO «MRD» DE JENNIFER TAYLOR Y DEL MUSEO DE HISTORIA NATURAL DE CLEVELAND



Australopithecus anamensis

por Fernanda Samaniego

Fernanda Samaniego es doctora en filosofía por la Universidad Complutense de Madrid y profesora en la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional Autónoma de México.



¿Hay ciencia en las medicinas alternativas?

Un estudio de caso a través de la diversidad médica mexicana

El camino que sigue cada persona ante una enfermedad o un malestar depende de la educación recibida, el contexto sociocultural y las experiencias que haya vivido. En México, por ejemplo, vivimos más de cien millones de personas y el sistema público de salud está saturado. Los tiempos de espera para ser atendido son prolongados y, a pesar de contar con médicos calificados y buenos servicios de urgencias, la atención primaria deja mucho que desear. Ante esta situación, los enfermos buscan alternativas para remediar sus dolencias, y la diversidad de las alternativas es tan grande como la diversidad cultural del país.

Unos optan por la automedicación, dado que hay un gran número de fármacos que pueden comprarse sin receta médica. En caso de necesitar la receta, es común acudir a la consulta gratuita que se ofrece en las farmacias (ese medicamento sí tiene un coste, pero la atención del médico no). Aquellos con un nivel socioeconómico alto, suelen contratar seguros médicos que les permiten hacer uso de hospitales privados con habitaciones de cinco estrellas. Otros tantos tienen simplemente un médico de confianza, al que acuden por un precio accesible. Ese médico de confianza puede haber recibido formación académica dentro de la medicina occidental experimental que se ejerce en la mayoría de los hospitales (médico alópata), o puede ser curandero indígena, acupunturista, homeópata, biomagnetólogo, naturista, ayurvédico, iridiólogo, santero o combinaciones de las anteriores.

¿Son esas medicinas alternativas genuinamente científicas o solo puede considerarse que tiene ese estatus la medicina occidental experimental? Para tratar de responder a esta pregunta, esbozaremos primero algunos criterios de cientificidad y luego discutiremos el caso de la diabetes en una comunidad indígena.

¿Qué es científico?

En la Viena de los años 1920 nació una rama de la filosofía dedicada a reflexionar sobre la ciencia. Su primera inquietud era formular una definición de «ciencia».



GETTY IMAGES/IVANASTAR/ISTOCK

Demarcar el conocimiento científico y descalificar las explicaciones espurias. Este ha sido, desde entonces, un proyecto emprendido, abandonado y retomado intermitentemente. Veamos algunos criterios de cientificidad propuestos por los filósofos de la ciencia.

Rudolf Carnap propone que, para que una proposición pueda considerarse científica, debe predecir hechos observables. Un caso ejemplar es la proposición «la luz puede viajar en trayectorias curvas». La teoría de la relatividad de Einstein predice la desviación de la luz cerca de cuerpos masivos, desviación que fue comprobada empíricamente por primera vez en 1919. Karl Popper también aplaudió la predicción einsteniana como un arriesgado acto de honestidad científica, pero su criterio de cientificidad no era la verificabilidad, sino la falsabilidad. Para el neopositivista Otto Neurath, otro criterio de cientificidad era la consistencia, esto es, la ausencia de contradicciones internas. En fecha más reciente, Paul Thagard ha profundizado en la coherencia como requisito de una buena explicación científica.

Por último, no podemos olvidar la propuesta de James Woodward. Según este filósofo, las ciencias proveen explicaciones causales que nos permiten controlar el evento que queremos explicar. Por tanto, contarán como científicas solo las explicaciones que sean capaces de diseñar una intervención, esto es, una forma de manipular los valores de la causa, para estudiar los cambios consecuentes en el supuesto efecto.

En resumen, para que un conocimiento pueda ser considerado científico debe ser empíricamente verificable o, al menos, refutable, coherente con el conjunto de la ciencia aceptada y, además, ofrecer una manera de manipular los efectos a través de la alteración de las causas.

La diabetes en la cultura tzeltal

Analicemos ahora la concepción de la diabetes que tienen algunos miembros de la comunidad indígena tzeltal de Tenejapa, en Chiapas. Para ello nos basaremos en la investigación realizada por el antropólogo de la Universidad Nacional Autónoma de México Jaime Tomás Page-Pliego, quien

entrevistó a 16 tzeltales diabéticos, año a año, desde el año 2005 hasta el 2015.

Los participantes del estudio se referían con frecuencia a la diabetes como «azúcar» y la identificaban como una enfermedad de la sangre. También manifestaban que era una enfermedad nueva, ya que no existía en la población décadas atrás, y 14 de ellos afirmaban que era incurable y que requería ser controlada con medicamentos durante los pocos años que les quedara de vida. Esos 14 enfermos recibían inyecciones de insulina en el hospital, pero solo algunos acudían puntualmente a las citas programadas.

Solamente dos mujeres, ambas analfabetas y monolingües, consideraban que su enfermedad era curable y que sanarían cuando encontraran un *majtanil* (curandero o «el que habla con la sangre») suficientemente poderoso para erradicarla. Ambas pensaban que la causa del mal había sido el *j-ak chamel* (envidia que le lanzan a uno). Por esa razón, bastaría un *majtanil* para curarlas.

En la mayoría de las narraciones de los diabéticos tzeltales, las causas de la diabetes eran biológicas. Relataban que fueron alcohólicos durante varios años o que tuvieron malos hábitos alimentarios. También identificaban como causa el consumo de nuevos productos llegados por carretera en la última década, como refrescos, papas fritas y pan dulce. Asimismo, reconocían que el alcohol había formado parte de la dieta y los rituales tzeltales durante varias generaciones, especialmente el aguardiente *pox* y la cerveza.

Si bien eran conscientes de que la salud de la comunidad se dañó con el consumo de los productos mencionados, varios de los afectados identificaban un momento especial, un «susto», que había desencadenado la diabetes en su cuerpo. Esos «sustos» se dan por penas, preocupaciones, tristezas o corajes, emociones que suelen producirse por accidentes en la carretera o relaciones problemáticas con otros miembros de la comunidad o del propio hogar.

Como parte de los tratamientos para la diabetes, y haciendo uso del sincretismo que caracteriza a la comunidad tzeltal de Tenejapa, los enfermos buscaban armonizar lo espiritual con lo material. Primero cumplían sus obligaciones espirituales, es decir, llevaban ofrendas a las deidades. Luego, si la enfermedad persistía, recurrían a medicamentos y prácticas de cuidado y respeto del cuerpo (evitando comer los productos causantes del «azúcar»). Como parte del tratamiento también practicaban el respeto a la sociedad, evitando la violencia y la envidia. El plano espiritual, comentaban, debe estar en armonía con el plano material, porque cuando se rompe esa armonía es cuando viene el «azúcar».

Análisis de cientificidad

Veamos ahora si la explicación tzeltal de la enfermedad es verificable o, al menos, falsable, si es coherente y si provee buenos medios para intervenir sobre la diabetes.

Las intervenciones recomendadas consisten, en el plano espiritual, en hacer ofrendas a las deidades y/o acudir al *majtanil*. Si el «susto» no es muy grave, una visita al *majtanil* será suficiente para curarse. Desafortunadamente, en el caso de la diabetes, varios pacientes han experimentado que acudir al curandero no ha sido suficiente para que desaparezcan los síntomas (sed, pérdida de peso, exceso de micción, etcétera), por lo que terminan recurriendo a tratamientos adicionales. En nuestro análisis causal, la intervención del *majtanil* se consideraría, por tanto, débil, lo cual no ayuda a establecer la cientificidad de las explicaciones.

Otras intervenciones orientadas a tratar el «susto», como «resolver conflictos» o «alejarse de la violencia», son coadyuvantes en el tratamiento de la diabetes y esto queda sustentado tanto en la etiología tzeltal (como anulación de una causa), como en la etiología médica (como anulación de comorbilidades). Sin embargo, el hecho de que funcionen solo en un porcentaje de casos, nos obliga a considerarlas intervenciones poco eficientes.

En el plano material, las intervenciones consistirían, por ejemplo, en reducir el sedentarismo y «dejar el alcohol». Esta intervención, en particular, disminuye sin duda la probabilidad de ser diabético. Así que, desde el punto de vista woodwardiano, la explicación tzeltal cumple con el requisito mínimo de cientificidad, al presentar una intervención (eliminar las bebidas alcohólicas) que regula el efecto «azúcar» y otras que coadyuvan a la mejoría. Esto, a su vez, implica que se cumple la adecuación empírica en los niveles biológico y fisiológico.

La parte espiritual, en cambio, no cumpliría el criterio carnapiano de verificación, ni el popperiano de refutación, al no ser capaz de proveer un método para testar empíricamente lo que se asevera.

Otro criterio de cientificidad que estaría en duda sería el de la coherencia interna. Si bien los diabéticos tzeltales comparten una misma concepción de la enfermedad llamada «azúcar», no todos concuerdan en la etiología ni en el tratamiento. Uno de los pacientes que empezó un tratamiento médico hospitalario, por ejemplo, decidió dejarlo porque «la insulina le estaba generando ceguera». Esa creencia es contradictoria con las de otros diabéticos tzeltales, por lo que, nos diría Neurath, su cientificidad estaría en duda.

Últimas reflexiones

Los criterios establecidos por la epistemología occidental (empiricidad, coherencia y manipulabilidad) se cumplen parcialmente en la medicina indígena tzeltal. Pero los problemas filosóficos no acaban aquí. Uno podría preguntarse por la idoneidad de dichos criterios y compararlos con los criterios epistémicos que se emplean en otras tradiciones culturales. Como bien señala León Olivé, «el meollo del asunto para el relativismo de los marcos conceptuales es el aspecto epistemológico: diferencias en las normas, las reglas y las creencias presupuestas en la aceptación y rechazo de creencias». Siguiendo a Olivé, me atrevo a sugerir una cierta apertura a las distintas tradiciones culturales, para entender que cada uno puede tener una noción personal de la salud y de la enfermedad y que se pueden establecer entre todos diálogos respetuosos en los que se den y reciban razones. IyC

PARA SABER MÁS

Relativismo cultural y filosofía en las Américas. León Olivé en *Relativismo Cultural y Filosofía*. Dirigido por Marcelo Dascal. Instituto de Investigaciones Filosóficas de la UNAM, págs. 83-108, 1992.

Making things happen: A theory of causal explanation. James Woodward. Oxford University Press. 2003.

Coherence, truth and the development of scientific knowledge. Paul Thagard en *Philosophy of Science*, vol. 74, n.º 1, págs. 28-47, enero de 2007.

Subjetivity about causality of diabetes mellitus in tseltals from main town Tenejapa, Chiapas. Jaime Tomás Page-Pliego en *LiminaR*, vol. 13, n.º 2, págs. 84-95, julio-diciembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Racionalidad en ciencia y tecnología. León Olivé en *IyC*, marzo de 2013.

¿Qué significa estar sano o enfermo? Cristian Saborido en *IyC*, enero de 2018.

Comprender el pluralismo médico. Enrique Perdiguero en *IyC*, julio de 2019.

por Han de Groot

Han de Groot es el director general de Rainforest Alliance, una ONG internacional que tiene por objeto la conservación y el aprovechamiento sostenible de los bosques.



Bosques contra la crisis climática

La protección de las masas forestales puede hacer mucho por la salvación del planeta

El cambio climático se ceba con los habitantes más vulnerables del planeta, en especial con las comunidades rurales pobres que dependen de la tierra como medio de subsistencia y con las poblaciones costeras de los trópicos. Todos hemos visto la desolación y la miseria que causan en tales entornos los episodios meteorológicos catastróficos, como huracanes, inundaciones, sequías o incendios forestales.

En busca de un remedio, los defensores del ambiente y los políticos han priorizado reducir el uso de los combustibles fósiles o aplicar las técnicas que secuestren el carbono antes de que alcance la atmósfera. Pero pese a su innegable importancia, esa visión ha relegado a un segundo plano el método más potente y económico que existe para la captura de ese elemento en la Tierra. Estudios recientes confirman que los bosques son indispensables para paliar el cambio climático, gracias a su capacidad de absorción y secuestro del carbono. Tanto es así que las soluciones naturales como la conservación y la repoblación de las masas forestales, junto con mejoras en la ordenación territorial, nos ayudarían a alcanzar el 37 por ciento del objetivo marcado, a saber, limitar el calentamiento hasta un máximo de 2 °C por encima de los valores preindustriales. Ello contrasta con el escaso 2,5 por ciento que tales soluciones reciben de toda la financiación pública.

La capacidad de los bosques para retener el dióxido de carbono es extraordinaria: un árbol almacena de media unos 22 kilogramos al año. Los bosques inalterados pueden asimilar las emisiones de CO_2 de algunos países enteros.

Los políticos y las empresas deben diseñar y poner en práctica medidas que impidan la deforestación, promuevan la reforestación de las tierras degradadas y fomenten la gestión sostenible de los bosques. Ello garantizará que las masas vegetales sigan desempeñando funciones esenciales, como la producción de oxígeno, la filtración del agua y el sostenimiento de la biodiversidad, además de suponer un medio de subsistencia para 1600 millones de habitantes.

Por desgracia, pese a los compromisos de las empresas y los Gobiernos para terminar con la deforestación, extensas superficies de bosque son convertidas en campos de cultivo para producir un puñado de materias primas que consumen cuantiosos recursos. Ha llegado la hora de reforzar la protección y la recuperación de los bosques. No es casual que la ONU haya declarado el 2020 Año Internacional de la Sanidad Vegetal, puesto que al mejorar la salud de los recursos vegetales podrán abordarse otros problemas acuciantes. Cabe citar la inseguridad alimentaria, que afecta a numerosas zonas: el arbolado mejora la productividad agrícola y brinda a los campesinos otra fuente de ingresos con la venta de la cosecha o la madera, en el llamado aprovechamiento agroforestal. Se calcula que si la inversión en este ámbito aumentase, ayudaría a secuestrar hasta 8420 millones de toneladas de CO_2, a la par que ahorraría 640.000 millones de euros hasta 2050. En los terrenos productivos en los que resulte difícil aumentar la cubierta forestal, este tipo de aprovechamiento sería una opción interesante.



En las regiones rurales más atrasadas, sobre todo en las tropicales, los programas comunitarios de gestión forestal pueden ser un camino para salir de la pobreza. En la región guatemalteca de Petén, por ejemplo, los bosques gestionados por los lugareños han gozado de un índice de deforestación casi nulo entre 2000 y 2013, en contraste con el sangrante 12 por ciento que afecta a las zonas protegidas y a las franjas de amortiguación circundantes. Esas comunidades han emprendido actividades comerciales ligadas a la selva, de bajo impacto y sostenibles que han mejorado la economía de la región lo suficiente como para invertir en escuelas y centros sanitarios. Su éxito resulta especialmente alentador en un lugar donde, fuera de esas zonas, el desmonte se ha multiplicado por veinte.

La restauración del paisaje promete una rentabilidad inigualable en virtud de los servicios ecosistémicos y del volumen de carbono secuestrado y almacenado. Según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, podría llegar a retener hasta 1540 millones de toneladas de CO_2 cada año. Los proyectos de reforestación también pueden entrelazarse con los sistemas humanos; los bosques restaurados suministran una base de recursos renovables y nuevas oportunidades económicas a las poblaciones locales.

El Reto de Bonn, promulgado por dirigentes mundiales con el objetivo de restaurar 150 millones de hectáreas de tierras degradadas hasta 2020, ha sido secundado por 57 Gobiernos y otras entidades. Numerosos colectivos se han comprometido a reducir a la mitad la deforestación del planeta en 2020 a través de la Declaración de Nueva York sobre los Bosques. Y como ejemplo ilustrativo de la cooperación entre los sectores público y privado, la Iniciativa Selvas y Cacao persigue poner fin a la deforestación motivada por este cultivo en Costa de Marfil, Ghana y Colombia.

Más árboles significan una vida mejor en un planeta más sostenible.

NICOLE XU



DENTRO DE LA TUBERÍA

Envuelta en acero inoxidable y rodeada de rocas empapadas, una de las dos cámaras de vacío de tres kilómetros de longitud se extiende por un túnel húmedo y goteante excavado bajo el monte Ikenoyama, en Japón. El intrincado sistema de láseres y espejos de su interior ha sido diseñado para «sintonizar» las ondas gravitacionales que llegan a nuestro planeta desde la otra punta del cosmos.



ENRICO SACCHETTI

EL OBSERVATORIO KAGRA

ASTROFÍSICA

El primer detector subterráneo de ondas gravitacionales entra en funcionamiento

Lee Billings

LAS ONDAS GRAVITACIONALES —ondulaciones del espaciotiempo producidas durante fusiones de agujeros negros, colisiones de estrellas de neutrones, explosiones de supernova y otros cataclismos astrofísicos— han revolucionado la astronomía. Predichas por la relatividad general de Einstein y detectadas por primera vez a finales de 2015, un siglo después de que el físico alemán formulase su teoría, estos esquivos susurros del espaciotiempo han comenzado a revelar numerosos detalles de los exóticos astros que los generan. Su estudio ha aportado la primera prueba directa de la existencia de agujeros negros, ha brindado una nueva manera de calcular la velocidad a la que se expande el universo y ha demostrado que las estrellas de neutrones son las principales fuentes de oro, platino y otros elementos pesados del universo. Más allá, puede que algún día permitan vislumbrar cómo era el universo una fracción de segundo después de la gran explosión.

Lee Billings es editor de *Scientific American* especializado en física y ciencias espaciales.



La vanguardia de estas investigaciones se encuentra ahora en un gran complejo subterráneo en el centro de Japón. A más de 200 metros bajo el monte Ikenoyama, en la prefectura de Gifu, y tras casi una década de construcción ininterrumpida, un equipo internacional de científicos, ingenieros y técnicos está terminando de poner a punto el Detector de Ondas Gravitacionales de Kamioka (KAGRA). En el momento de enviar a imprenta este artículo, está previsto que el observatorio comience a funcionar a finales de 2019, momento en que se unirá a los otros tres detectores de ondas gravitacionales que ya existen en el mundo: las dos estaciones gemelas del Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), en EE.UU., y el instrumento Virgo, en Italia. Tanto la ubicación japonesa de KAGRA como su orientación con respecto a LIGO y Virgo servirán para comprobar de manera independiente las observaciones de estos últimos y mejorarlas. En conjunto, este cuarteto de instrumentos alcanzará nuevas cotas de sensibilidad y de precisión. Podrá detectar ondas gravitacionales más débiles y determinar sus coordenadas celestes con una agudeza sin precedentes, lo que a su vez permitirá que los telescopios tradicionales puedan apuntar a esas regiones del cielo y sumarse a las observaciones. Las fotografías incluidas en este artículo muestran algunos de los últimos preparativos técnicos antes de que KAGRA comience a «escuchar el cielo».

El observatorio japonés se basa en la misma técnica de detección que emplean LIGO y Virgo, un método conocido como interferometría láser. En él, un haz láser rebota entre dos espejos que se encuentran suspendidos en los extremos de sendas cámaras de vacío con forma de tubería. Estas miden varios kilómetros de largo y son perpendiculares entre sí, con lo que forman una especie de L gigante. El láser permite detectar los cambios de distancia entre los espejos: cuando pasa una onda gravitacional, el espaciotiempo se estira y se encoge brevemente, lo que altera la longitud de las cámaras y, con ello, el tiempo que

EN SÍNTESIS

Desde 2015, la posibilidad de detectar ondas gravitacionales ha revolucionado la astronomía al permitir observar colisiones de agujeros negros y estrellas de neutrones. Actualmente existen en el mundo tres detectores de este tipo.

Japón acaba de concluir la construcción de un cuarto observatorio. El Detector de Ondas Gravitacionales de Kamioka (KAGRA) será el primer instrumento que opere bajo tierra y a temperaturas ultrabajas.

KAGRA permitirá detectar ondas gravitacionales más débiles y medir con mayor precisión la localización de los cataclismos astrofísicos que las causan. También pondrá a prueba nuevas tecnologías para la próxima generación de observatorios.



ENRICO SACCHETTI

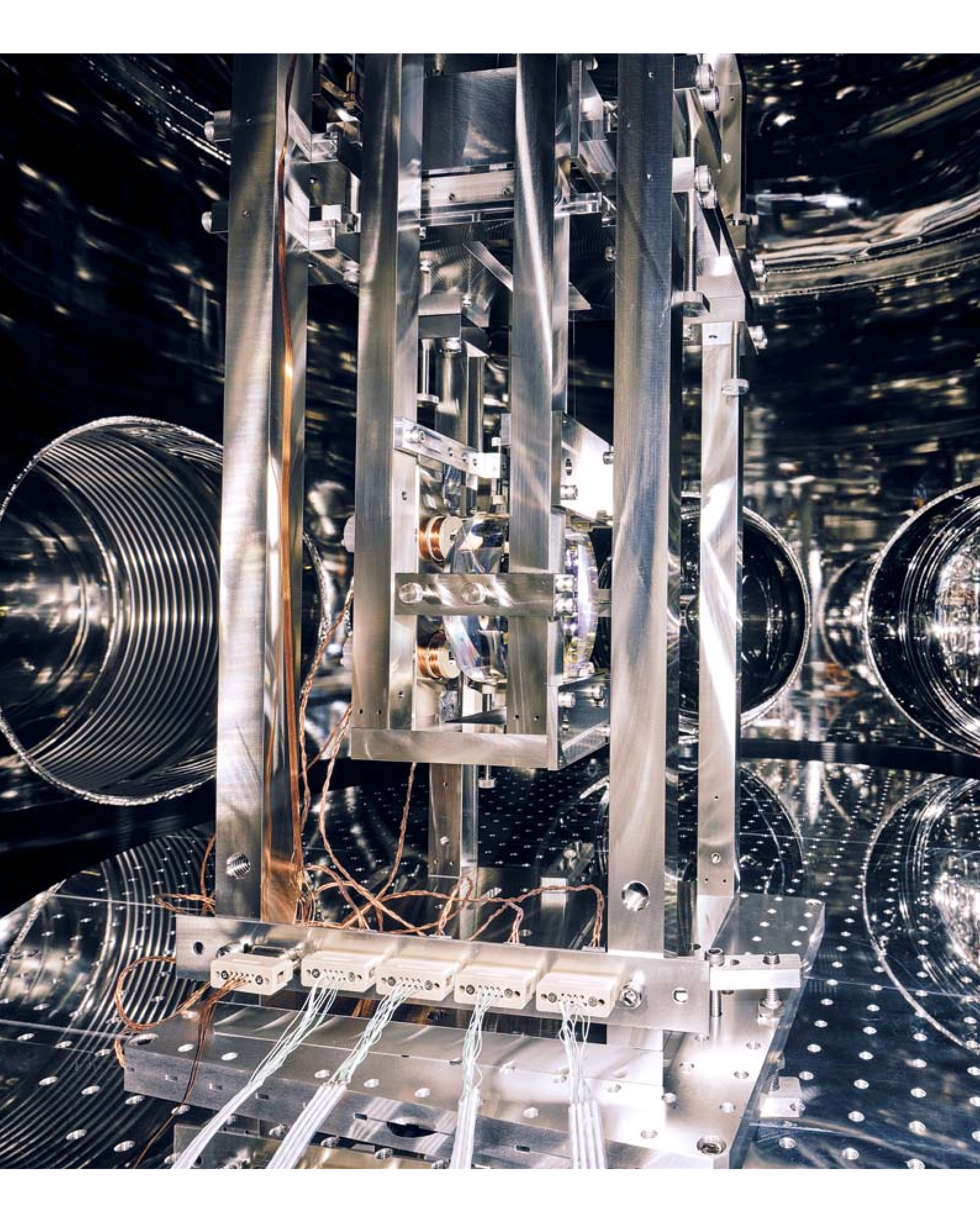
tarda el láser en recorrer el camino de ida y vuelta. Tales desplazamientos son mínimos, muy inferiores al diámetro de un protón, por lo que el dispositivo debe tener en cuenta o suprimir de algún modo el abanico casi ilimitado de fuentes de ruido, desde las sacudidas provocadas por movimientos sísmicos y mareas hasta las pequeñas vibraciones causadas por aviones y automóviles cercanos, la fauna circundante o incluso las oscilaciones de los átomos de los espejos. Distinguir entre una onda gravitacional genuina y las señales espurias causadas por todos esos fenómenos constituye una tarea abrumadora. En el caso de LIGO y Virgo, tales efectos han generado numerosas falsas alarmas.

Situado bajo una montaña, KAGRA será el primer gran interferómetro láser completamente construido y manejado bajo tierra, lejos de la cacofonía de la superficie terrestre. También será el primero en usar espejos (dos cilindros de 23 kilogramos de cristal de zafiro pulido) enfriados criogénicamente. Eso reducirá de manera drástica las vibraciones térmicas y debería redundar en un aumento de la sensibilidad. Mientras que los espejos de LIGO y Virgo funcionan a temperatura ambiente, los de KAGRA lo harán a unos gélidos 20 grados sobre el cero absoluto.

Ambas características deberían permitir que KAGRA detectase ondas gravitacionales más débiles que las observadas hasta ahora por LIGO y Virgo, pero también presentan algunos inconvenientes. Los sistemas mecánicos que mantienen fríos los espejos generan sus propias vibraciones, y el agua filtrada de la nieve y la lluvia alcanzará los túneles del complejo. Aunque los científicos instalarán láminas de plástico para proteger los delicados equipos, es posible que las operaciones tengan que detenerse durante las épocas más húmedas del año. Pero si todo va según lo previsto, KAGRA no solo efectuará importantes descubrimientos, sino que también permitirá poner a prueba nueva tecnología para una próxima generación de detectores de ondas gravitacionales a lo largo del globo.

AMORTIGUAR LAS VIBRACIONES

Un técnico se agacha junto a la parte superior del sistema de aislamiento antivibraciones de uno de los espejos de zafiro pulido de KAGRA. Tales sistemas, de 14 metros de altura, amortiguan las perturbaciones externas y son necesarios para detectar la minúscula señal producida por el paso de ondas gravitacionales: el desplazamiento en los espejos causado por estas es inferior a la milésima parte del radio de un protón.





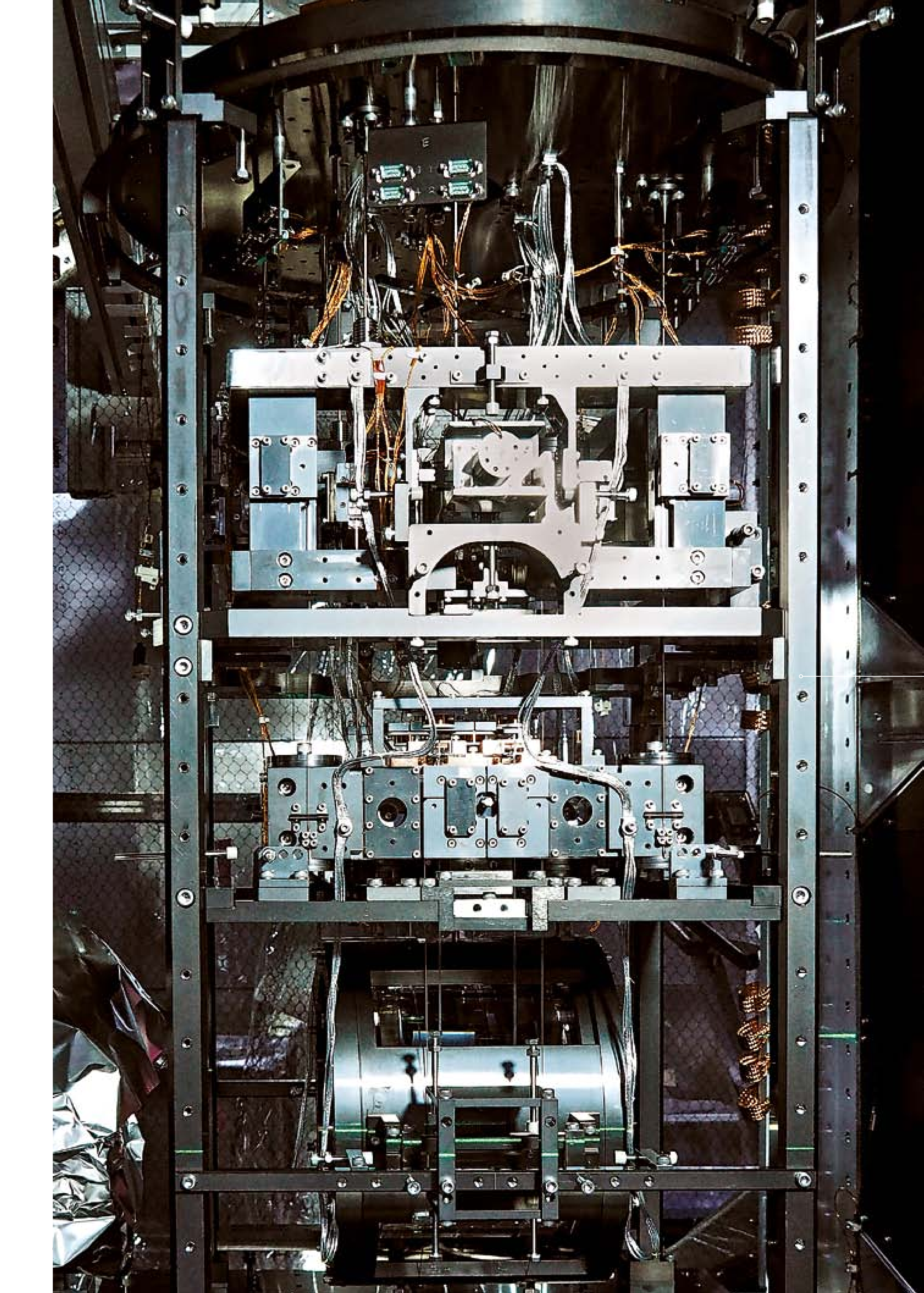
PÁGINA OPUESTA: ENRICO SACCHETTI; EN ESTA PÁGINA: ROHAN MEHRA

HAZ FOCALIZADO

Para garantizar que KAGRA registre las distorsiones casi imperceptibles que causan las ondas gravitacionales en sus espejos, los científicos deben controlar meticulosamente la posición y la intensidad del láser. Eso requiere transmitirlo a través de un sistema que actúa como un telescopio (*mostrado aquí*), acoplado a otro dispositivo de aislamiento antivibraciones y alojado en el interior de una cámara de vacío.

MANTENER EL FRÍO

Un técnico revisa el sistema de suspensión de un espejo antes de instalarlo en el interior de los tanques criogénicos de KAGRA. Una vez dentro, el espejo y su montura se enfrían hasta temperaturas próximas al cero absoluto. Ello pretende minimizar las vibraciones térmicas de sus átomos, una mejora diseñada para detectar ondas gravitacionales más débiles.





ESPEJOS

Otra vista del delicado aparato que sostiene el espejo antes de su instalación en el sistema criogénico de KAGRA. El espejo de zafiro se encuentra en la cámara cilíndrica del nivel inferior, suspendido de cuatro delgadas fibras también de zafiro. Los otros tres niveles verticales contienen componentes para aislar al conjunto del ruido sísmico. Han sido fabricados con materiales capaces de soportar las temperaturas extremadamente frías a las que opera KAGRA.

CENTRO DE CONTROL

Todos los instrumentos de KAGRA se controlan desde esta sala, situada en la superficie y a diez minutos en coche de la entrada al complejo subterráneo. En la pared, un panel con seis grandes pantallas muestra la temperatura, la humedad y las condiciones de trabajo en KAGRA. A la derecha, otros monitores de menor tamaño presentan imágenes del recorrido del láser a través de los túneles de vacío e información de la actividad sísmica a lo largo de Japón.

PÁGINA OPUESTA: INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RAYOS CÓSMICOS, UNIVERSIDAD DE TOKIO; EN ESTA PÁGINA: ENRICO SACCHETTI

PARA SABER MÁS

Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. Colaboraciones LIGO y Virgo en *Physical Review Letters*, vol. 116, art. 061102, febrero de 2016.

KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector. Colaboración KAGRA en *Nature Astronomy*, vol. 3, págs. 35-40, enero de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

La observación de ondas gravitacionales con LIGO. Alicia M. Sintes y Borja Sorazu en *IyC*, febrero de 2017.

Agujeros negros primordiales y materia oscura. Juan García-Bellido y Sébastien Clesse en *IyC*, septiembre de 2017.

Ecos desde el horizonte. Pablo Bueno y Pablo A. Cano en *IyC*, junio de 2019.



ETOLOGÍA

CON UN OJO ABIERTO

¿Por qué adquirieron los delfines, las focas y otros animales la facultad de dormir con la mitad del cerebro despierto?

Gian Gastone Mascetti

Ilustración de Giulia Neri

Gian Gastone Mascetti es investigador de neurofisiología en el Departamento de Psicología General de la Universidad de Padua, donde se jubiló como profesor de dicha especialidad. Sus estudios se centran en el sueño, en concreto en la relación de este con la lateralización del cerebro.



UNO DE LOS RASGOS MÁS SORPRENDENTES DE LOS SERES vivos, sean animales o plantas, es el modo en que han adaptado la fisiología y el comportamiento para seguir las fluctuaciones de la luz diurna y la oscuridad nocturna. Un reloj cerebral sincronizado con indicadores ambientales genera cambios biológicos que se suceden a lo largo de ciclos de 24 horas; son los ritmos circadianos (del latín *circa* y *diem*, «aproximadamente» y «día»). De ese modo, la rotación terrestre está grabada en la dinámica de nuestros circuitos neuronales.

El ciclo de vigilia y sueño es un ritmo circadiano clásico. La vigilia se caracteriza por la actividad sensorial y la motricidad; durante el sueño, los sentidos desconectan del entorno y la motricidad se reduce a una mínima expresión. Esta pérdida periódica de consciencia queda reflejada en el trazado del electroencefalograma (EEG) de una forma clara: el sueño profundo consiste en oscilaciones lentas de gran amplitud. En cambio, la vigilia se caracteriza por oscilaciones rápidas y de baja amplitud. Numerosos aspectos del sueño escapan aún a nuestro conocimiento, empero. ¿Por qué un animal suspende durante horas toda la actividad sensorial y motriz básica, quedando así a merced de eventuales depredadores? Esta pregunta resulta más intrigante, si cabe, en los mamíferos acuáticos, que precisan regular la respiración y la temperatura corporal mientras duermen.

Algunos animales han resuelto este problema adquiriendo la facultad de dormir con la mitad del cerebro, mientras la mitad restante permanece alerta, un comportamiento que ha sido denominado sueño de ondas lentas unihemisférico. Otros se entregan a este tipo de sueño en circunstancias concretas, pero mandan los dos hemisferios a dormir cuando es preciso. Los mamíferos marinos, las aves marinas y posiblemente algunos reptiles adoptan un estado de semivigilia, pues en ocasiones mantienen un ojo abierto durante esos lapsos. En fecha reciente se ha descubierto incluso una forma vestigial de sueño unihemisférico en la especie humana.

Ese «dormir a medias» abre una ventana fascinante al estudio del sueño. Es posible escrutar la mitad durmiente mientras el lado opuesto sirve como testigo de referencia del experimento.

EN SÍNTESIS

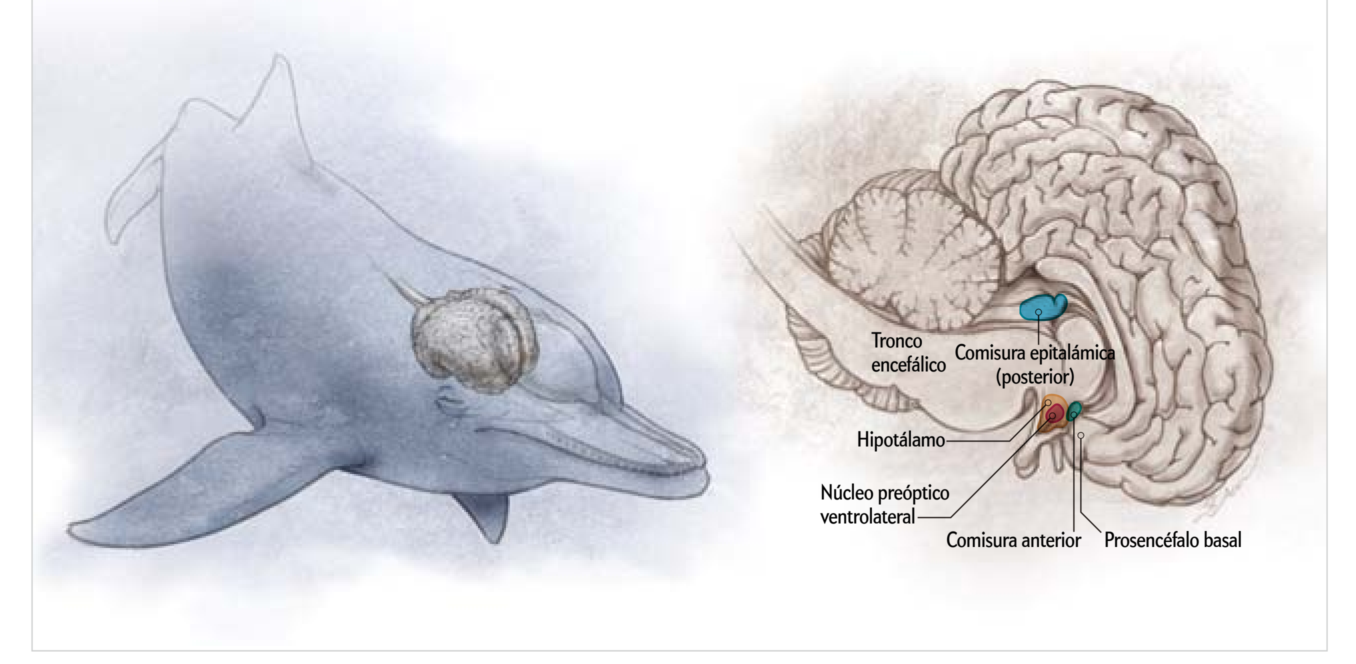
Durante el sueño, los sentidos desconectan del entorno y la motricidad se reduce a una mínima expresión. Este paréntesis suscita la pregunta de por qué un animal suspende las actividades básicas del cerebro durante horas interminables, quedando por completo a merced de eventuales depredadores.

Algunos animales han resuelto este dilema adquiriendo la facultad de dormir con la mitad del cerebro mientras la otra permanece vigilante, un estado intermedio que recibe el nombre de sueño de ondas lentas unihemisférico.

La semivigilia abre una ventana fascinante al estudio del sueño. Es posible escrutar la mitad durmiente del cerebro, mientras la otra se convierte en el testigo de referencia del experimento. La investigación en esta línea podría revelar aspectos sobre los trastornos humanos del sueño.

Medio dormido, medio despierto

Diversas regiones del encéfalo, como el tronco encefálico, el hipotálamo y el prosencéfalo basal, interaccionan durante el ciclo de vigilia y sueño. En el delfín, la coordinación primorosa de los hemisferios cerebrales permite a uno de ellos echar una cabezada mientras el otro permanece alerta. Un modelo sobre el sueño unihemisférico concebido en la Universidad de Sídney en 2012 muestra que los núcleos preópticos ventrolaterales del hipotálamo situados en ambos hemisferios intercambian mensajes entre sí para decidir cuál de los dos debe dormir y cuál debe permanecer vigilante. Las comisuras epitalámicas del tronco encefálico también facilitan esta comunicación.



SHIZ AOKI Y JERRY GU, ANATOMIZE STUDIOS

La capacidad para medrar con una privación relativa del sueño, como los delfines y algunas aves hacen, podría aportar ideas para el tratamiento de los trastornos del sueño en la especie humana, cuyos efectos a menudo se hacen sentir más en un hemisferio cerebral que en otro.

DORMIDO, PERO NO DEL TODO

El estudio del sueño unihemisférico dio comienzo en 1964, cuando el controvertido investigador John C. Lilly planteó que los delfines podían dormir con un solo lado del cerebro al constatar que durante su descanso diario solo mantenían un ojo cerrado. Supuso que mientras dormían, seguían vigilando y escuchando lo que sucedía en derredor. Se necesitarían experimentos posteriores para averiguar qué estaba sucediendo en el encéfalo de este cetáceo.

Los cetáceos (ballenas, delfines y marsopas) constituyen aún sujetos de estudio en el campo del sueño unihemisférico. Conservan dos rasgos fisiológicos heredados de sus lejanos ancestros terrestres: pulmones para respirar y mecanismos de termorregulación con los que mantienen una temperatura corporal casi invariable. Y parece que dormir con la mitad del cerebro ha contribuido a la conservación de esos caracteres en el medio acuático.

Años más tarde, el equipo encabezado por Lev Mukhametov, del Instituto A. N. Severtsov de Ecología y Evolución de la Academia Rusa de Ciencias, estudió con mayor detenimiento que Lilly lo que sucede en el encéfalo de los cetáceos. Él y sus colaboradores examinaron extensamente el sueño en el delfín mular. En los trazados del EEG hallaron de forma sistemática que uno de los hemisferios quedaba sumido en un sueño de ondas lentas, mientras que el otro permanecía en vilo. Apenas observaron que se diera el sueño en ambos hemisferios (el denominado sueño de ondas lentas bihemisférico), ni tampoco registraron signos claros del sueño de movimientos oculares rápidos (MOR), vinculado con las experiencias oníricas.

En el curso del sueño unihemisférico, el hemisferio despierto del delfín controla la natación y el ascenso a la superficie para respirar. Como Lilly sospechó en su observación somera, el ojo abierto, conectado al hemisferio contralateral despierto, permite al animal permanecer atento ante posibles depredadores y nadar al unísono con sus compañeros mientras la otra mitad del cerebro descansa. En 1999, P. Dawn Goley, del departamento de ciencias biológicas de la Universidad Estatal Humboldt, observó (igual que hicieron Guido Gnone, del Acuario de Génova, y sus colaboradores en 2001) que cuando los delfines nadan en grupo, el ojo abierto mantiene el contacto visual con otros miembros de la manada. Si el compañero nada hacia el flanco opuesto, el otro ojo toma el relevo.

Los delfines también afrontan temperaturas frías del agua que provocan una gran pérdida de calor corporal. Mantener un hemisferio activo durante el descanso les permite generar calor agitando con frecuencia las aletas y la cola y nadando cerca de la superficie mientras duermen, un comportamiento descrito por Praneshri Pillay y Paul R. Manger, de la Universidad del Witwatersrand, en Johannesburgo.

Sabemos que en los cetáceos y en otros animales son varias las regiones del encéfalo involucradas en el control del ciclo de

vigilia y sueño, entre ellas el tronco encefálico, el hipotálamo y el prosencéfalo basal. La identidad exacta de los reguladores del sueño unihemisférico sigue siendo un misterio, pero contamos con algunas pistas. En 2012, David J. Kedziora y su equipo de la Universidad de Sídney elaboraron un modelo matemático del sueño unihemisférico con el que pretendían representar los hábitos de descanso del delfín. En él, ciertas partes del hipotálamo radicadas en ambos hemisferios (los núcleos preópticos ventrolaterales) intercambian mensajes que regulan el sueño cuando este se produce en cada hemisferio. Al parecer, las señales inhibidoras transmitidas entre los dos hemisferios permitirían que un lado se marche a dormir mientras el otro permanece despierto. También estarían involucradas otras regiones profundas, como las comisuras epitalámicas (o posteriores) del tronco encefálico. Estas se hallan muy desarrolladas en el delfín, lo que da lugar a preguntas sobre su cometido en el control del sueño. El modelo de la Universidad de Sídney brinda a los neurocientíficos un medio para explorar los mecanismos que el encéfalo despliega para la delicada tarea de asignar el sueño a uno u otro hemisferio.

En el agua, el oso marino septentrional duerme con un solo hemisferio y adopta una postura que le permite respirar y permanecer alerta ante posibles depredadores

Los indicadores ambientales también parecen desempeñar un cometido. Puesto que las neuronas hipnógenas del hipotálamo son termosensibles, el aumento o el descenso de la temperatura del encéfalo causa una fluctuación paralela en la transmisión de impulsos nerviosos de estas neuronas. Así, en 1982, Mukhametov y sus colaboradores descubrieron que durante el sueño unihemisférico la temperatura del cerebro del delfín descendía en el hemisferio durmiente y permanecía constante en el despierto.

UNA ADAPTACIÓN SINGULAR

Los cetáceos surgieron a partir de un ancestro terrestre común con los hipopótamos y otros ungulados. El paso de la tierra firme al medio acuático fue gradual y pudo incluir una transición anfibia que comportó notables adaptaciones fisiológicas y etológicas. En consecuencia, la conducta de sueño de los cetáceos constituye un singular ejemplo de adaptación a un entorno nuevo que demuestra una solución intermedia entre la necesidad de dormir y la supervivencia.

No son los únicos que asumieron un compromiso semejante. Las focas han adoptado diversas soluciones evolutivas frente al problema tan similar de respirar y dormir en el agua y en tierra firme. Algunas familias de focas renuncian al sueño unihemisférico. No ha resultado ser el caso de las focas «verdaderas» (fócidos), como la foca común (*Phoca vitulina*) o los elefantes marinos (*Mirounga*).

En cambio, en el oso marino septentrional (*Callorhinus ursinus*; otáridos), la historia es distinta. En 2017, Oleg I. Lyamin, del Instituto A. N. Severtsov de Ecología y Evolución, describió que, a diferencia de los delfines, que raramente parecen experimentar el sueño bihemisférico y tal vez nunca el MOR, este pinnípedo presenta varios tipos de sueño, entre ellos el unihemisférico, el bihemisférico y el MOR, tanto en sus dominios acuáticos como en los terrestres. En tierra predomina el bihemisférico, mientras que en el agua el unihemisférico se prolonga y el MOR disminuye o incluso desaparece.

Cuando se sumergen y experimentan el sueño unihemisférico, los osos marinos adoptan una postura que les permite dormir, respirar y, al mismo tiempo, detectar la aproximación de posibles depredadores: yacen sobre un costado, con una aleta sumergida en el agua que no cesan de mover mientras mantienen las tres restantes en el aire para reducir la pérdida de calor. Los orificios nasales permanecen fuera del agua para inhalar aire. El hemisferio situado en el lado opuesto a la aleta en movimiento (y al ojo abierto) permanece alerta, de modo que los animales pueden enviar las órdenes motrices necesarias para aletear y conservar la estabilidad postural. En tierra, el sueño unihemisférico permite a los osos marinos mantener la guardia y coordinar su actividad con la de sus compañeros, pero no interviene en el control de la respiración, de la temperatura corporal o de la coordinación motriz.

Algunas aves optan asimismo por el sueño unihemisférico en su esfuerzo por conciliar la necesidad del descanso con la de mantenerse ojo avizor ante las amenazas. (A veces, lo combinan con el bihemisférico y el MOR). En 1996, Jadwiga Szymczak, entonces en la Universidad Nicolás Copérnico, en Polonia, registró ondas lentas de EEG en un hemisferio del mirlo común (*Turdus merula*). Y en 2001, Niels C. Rattenborg, entonces en el departamento de ciencias biológicas de la Universidad Estatal de Indiana, y sus colaboradores hicieron lo mismo en la paloma. De modo similar, Rattenborg había descubierto en 1999 que el ánade real (*Anas platyrhynchos*) dormía con solo la mitad del cerebro para mantener la guardia. Los patos que mantenían un ojo abierto mientras permanecían en el perímetro exterior de la bandada posada mostraban un nivel de sueño unihemisférico un 150 por ciento mayor que los situados en el centro. El ojo abierto de estos «vigías» estaba dirigido hacia los alrededores. Mark A. Elgar, ahora en la Universidad de Melbourne, comunicó en un estudio de 1989 que la vigilancia disminuye conforme la bandada crece en número y el animal se desplaza hacia el centro de ella.

Las aves migratorias también confían en diversas estrategias para echar una cabezada durante sus largos vuelos sin escalas. En 2016, Rattenborg, ahora en el Instituto Max Planck de Ornitología, en Seewiesen, y su equipo estudió el sueño uni y bihemisférico en el rabihorcado grande (*Fregata minor*) en el curso de sus vuelos ininterrumpidos sobre la mar, de hasta diez días de duración. En un episodio de sueño unihemisférico, el hemisferio contralateral a la dirección tomada en un cambio de rumbo mostró un trazado EEG propio de la vigilia, lo cual indica que el ojo abierto del lado opuesto estaba mirando hacia donde se dirigía la bandada. Por su parte, Thomas Fuchs, entonces

en la Universidad Estatal Bowling Green, descubrió en 2006 que el zorzalito de Swainson (*Catharus ustulatus*) compensa la privación de sueño durante el vuelo nocturno aumentando el tiempo total que dedica a dormir por medio de «microcabezadas» diurnas (de segundos), que echa mientras permanece posado y en las que cierra un solo ojo.

¿Y NOSOTROS?

Los humanos no presentamos el sueño unihemisférico clásico, pero en ciertos casos experimentamos algo parecido. Masako Tamaki y su grupo de la Universidad Brown realizaron EEG a personas que pernoctaban en un lugar desconocido para ellas. Según relataron en una publicación de 2016, los EEG revelaron ondas lentas indicadoras de sueño profundo en el hemisferio derecho y actividad superficial de ondas lentas en el izquierdo, un signo de mayor estado de alerta. Este último hemisferio, además, se despertaba más fácilmente que el opuesto. Tal asimetría, calificada como el efecto de la primera noche, parece mantener la vigilancia en los lugares inusuales y desaparece a partir de la segunda noche. Es reminiscente del sueño ligero que la madre demuestra ante el llanto del bebé u otro sonido reconocible como procedente de él.

Los humanos podemos acusar la falta de sueño después de la primera noche fuera de casa, pero los animales que duermen siempre con una mitad del cerebro parecen estar adaptados a su devenir cotidiano. Aquellos que se sumen en el sueño unihemisférico pasan menos tiempo durmiendo, en comparación con los que adoptan el sueño bihemisférico o el MOR.

Pese a todo, su capacidad para nadar, volar, comer o socializar con sus congéneres permanece invariable. Los delfines pasan casi dos tercios del día despiertos y el resto sumidos en un sueño unihemisférico, repartiendo el tiempo de este entre ambos lados. La recuperación del cerebro y del cuerpo no parece resultar afectada a raíz de ello, a pesar de la ausencia de sueño MOR.

Mukhametov y sus colaboradores describieron en 1997 que los delfines que participaban en sus estudios del sueño parecían gozar siempre de buena salud. En cautividad, en la que es posible una observación atenta, los animales lograron aprender y memorizar tareas complejas. Los rabihorcados redujeron drásticamente el sueño total durante el vuelo, pero mantuvieron un alto grado de atención y un buen rendimiento en sus dilatadas travesías.

Algunas especies parecen tolerar ese estado de semivigilia compartiendo con otros la carga que supone. Los ánades reales que mantienen un ojo avizor para supervisar la bandada se privan de sueño, pero su comportamiento no se resiente. Otro día ese cometido recae en un compañero. El sueño unihemisférico sigue fascinando a la comunidad científica porque ilustra las diversas estrategias evolutivas que los animales han adoptado para completar el reposo diario.

El interés generado por este tipo de sueño en los experimentos de campo lo han convertido incluso en un instrumento de laboratorio con el que explorar el papel del descanso, con el objetivo último de modelar el desarrollo cerebral del recién nacido. En 1999, mi grupo del departamento de psicología general de la Universidad de Padua descubrió que, durante la primera semana de vida, los pollos (*Gallus gallus*) experimentaban más sueño con el hemisferio izquierdo. Los polluelos optaban con preferencia por él para aprender acerca de ciertos estímulos (formas y colores) que su joven cerebro tenía que procesar por vez primera: el sueño parecía intervenir en la organización de lo recién aprendido.

El sueño del hemisferio derecho aumentó en los pollos a medida que el análisis espacial y el procesamiento de los acontecimientos nuevos prevalecieron en ese lado durante la segunda semana de vida. Cuando los adiestramos en una tarea de discriminación del color, registraron más sueño unihemisférico izquierdo (con el ojo derecho cerrado y el hemisferio izquierdo dormido), porque ese lado del cerebro es el dominante en la percepción de los colores. Los pollos usaron el ojo izquierdo en una tarea de aprendizaje espacial que les exigía elegir entre cuatro recipientes situados en una esquina concreta del recinto donde se hallaban. Tenían que escoger el recipiente provisto de un orificio en su parte superior, que daba acceso a una recompensa apetitosa. Una vez que lo lograron, mostraron más sueño unihemisférico derecho (con el ojo izquierdo cerrado y el hemisferio derecho durmiente) para dar descanso al lado del cerebro que se especializa en ese tipo de tarea.

El hemisferio más activo, ya se hubiera sumido en el sueño unihemisférico o en el bihemisférico, pasaba relativamente más tiempo dormido para recuperarse. Entretanto, el ojo abierto en el lado del hemisferio no dominante tomaba el relevo y permanecía atento a lo que sucedía alrededor. Así, el paso de un objeto oscuro a través de la jaula durante el sueño unihemisférico hizo que los pollitos se despertaran en el acto y rompieran a piar alarmados. La vigilancia, pues, permaneció intacta sin que el sueño perdiera su función de poner en orden las intensas experiencias sensoriales que estas aves viven en sus primeros días de vida.

En definitiva, el estudio de los animales que duermen con la mitad del cerebro podría ayudarnos a desentrañar el enigma biológico que envuelve al sueño, tal vez incluso los trastornos del sueño que nos afligen. La apnea y otras alteraciones a veces afectan más a un hemisferio que a otro. Esta labor podría ayudar a conocer el modo en que una especie contrapesa las ventajas del descanso con el imperativo de protegerse contra los depredadores. Dormir con la mitad del cerebro es una solución brillante a ese dilema y le permite al animal experimentar los estados de consciencia y de inconsciencia al mismo tiempo. El estudio del sueño unihemisférico resuena a través de los siglos en un pasaje de los *Fragmentos* de Heráclito citado con frecuencia: «Incluso un alma sumergida en un profundo sueño trabaja duro y ayuda para hacer algo en el mundo». MyC

PARA SABER MÁS

Cetacean sleep: an unusual form of mammalian sleep. Oleg I. Lyamin et al. en *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 32, n.º 8, págs. 1451-1484, octubre de 2008.
Physiologically based quantitative modeling of unihemispheric sleep. D. J. Kedziora et al. en *Journal of Theoretical Biology*, vol. 314, págs. 109-119, diciembre de 2012.
Unihemispheric sleep and asymmetrical sleep: Behavioral, neurophysiological, and functional perspectives. Gian Gastone Mascetti en *Nature and Science of Sleep*, vol. 8, págs. 221-238, octubre de 2016.
Evidence that birds sleep in mid-flight. Niels C. Rattenborg et al. en *Nature Communications*, vol. 7, artículo n.º 12468, agosto de 2016.
Sleep in the northern fur seal. Oleg I. Lyamin et al. en *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 44, págs. 144-151, junio de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

La siesta es para las aves. Rachel Mahan en *MyC*, n.º 38, 2009.
Las funciones vitales del sueño. Robert Stickgold en *IyC*, diciembre de 2015.

BIOLOGÍA

La epigenética, moduladora clave de la evolución

Dos expertos nos hablan de los variados mecanismos epigenéticos que existen en la naturaleza y de su papel a la hora de favorecer cambios en una especie

Marie-Neige Cordonnier

La epigenética engloba todos los procesos de regulación de la expresión de los genes y determina, en última instancia, el modo en que se desarrolla un órgano o una función del cuerpo. En los últimos años se están descubriendo una gran variedad de mecanismos epigenéticos. Al mantener bajo control un poderoso reservorio de variaciones en el genoma, podrían ejercer un efecto importante dentro de una especie. Edith Heard, directora del Laboratorio Europeo de Biología Molecular, y Vincent Colot, de la Escuela Normal Superior de París, nos explican en la siguiente entrevista cómo se ve afectado ese control por los cambios que se producen en el ambiente.

EN SÍNTESIS

El ambiente puede influir en la epigenética de un organismo, el conjunto de reacciones y mecanismos que regulan la actividad de los genes sin alterar la secuencia del ADN.

Dos expertos hablan de su experiencia y la de otros grupos en esta materia, en especial de los mecanimos epigenéticos que se han observado en plantas y animales.

Explican varios de ellos, como la metillación del ADN, la organización tridimensional de la cromatina o el control que ejercen los transposones sobre el genoma, y destacan su contribución a la hora de fijar mutaciones en una especie.





VINCENT COLOT
es director de investigación del Centro Nacional de Investigación Científica de Francia y dirige el Grupo de Dinámica de los Genomas y Variación Epigenética en la Escuela Normal Superior de París.

EDITH HEARD
es directora general del Laboratorio Europeo de Biología Molecular, en Heidelberg, y catedrática de epigenética y memoria celular en el Colegio de Francia, en París.

¿Cómo definirían ustedes la epigenética hoy en día?

Edith Heard: La definición sobre la que se basa mi trabajo surge de las investigaciones que el británico Robin Holliday y el estadounidense Arthur Riggs llevaron a cabo en los años setenta del siglo xx: la epigenética es el conjunto de cambios de expresión de los genes que se transmiten a lo largo de las divisiones celulares o a través de las generaciones y que no implican ningún cambio de la secuencia del ADN. No obstante, la definición de Conrad Waddington ha retomado fuerza al cabo de unos veinte años. En 1942, este biólogo británico quiso acercar dos dominios, la genética y la embriología, con el objeto de establecer un lazo entre el genotipo (el patrimonio hereditario de un individuo, del que se encargan los genes) y el fenotipo (los caracteres observables). En esa época, no se sabía de qué estaban hechos los genes y Waddington propuso que se denominara epigenética al estudio de los mecanismos del desarrollo mediante los cuales los genes determinan los caracteres. Esta definición ha tomado un sentido más general hoy en día, a medida que nos vamos interesando por las variaciones más o menos grandes de los fenotipos que, para un mismo genotipo, pueden engendrar los diferentes entornos.

Vincent Colot: Sí, la definición de Waddington prevalece en nuestros días: para resumirla, engloba todos los procesos de regulación de la expresión génica, tanto en el desarrollo como en respuesta a las señales del entorno. Se sabe que, en los eucariotas (los organismos cuyas células tienen núcleo), esta regulación hace que intervengan numerosos mecanismos que actúan sobre la cromatina (la estructura compacta que forman dentro del núcleo el ADN y las proteínas de tipo histona alrededor de las cuales se enrolla). Por mi parte, como Edith, lo que me interesa son los mecanismos de control que conducen a una «memoria» de los estados de expresión de los genes a lo largo de las divisiones celulares o de las generaciones, y sus consecuencias. En este contexto, en concreto en las plantas, es donde estudio cómo se hereda de generación en generación una marca de la cromatina: la metilación del ADN, esto es, la adición de un grupo metilo (CH_3) en determinados nucleótidos de su secuencia.

¿Se conocen muchos mecanismos epigenéticos?

V. C.: Sí, son muy variados, sobre todo en los eucariotas, en los que la regulación de la expresión génica es bastante más compleja que en las bacterias. El ADN no solo se lee y se transcribe para producir proteínas, sino que se enrolla alrededor de las histonas, las cuales, a su vez, están sujetas a numerosas modificaciones químicas. La cromatina interacciona también con los ARN (productos de la lectura del ADN) que se denominan no codificantes porque su función no es la de traducirse en

JERÔME BRÉBION, INSTITUTO CURIE *(E. Heard)*; PATRICK ALLARD, REA *(V. Colot)*

proteínas. La organización tridimensional de la cromatina en el núcleo también desempeña una función importante, como Edith ha demostrado para el cromosoma X.

E. H.: Además de los mecanismos relacionados con la cromatina, existen otras muchas estrategias que los investigadores están empezando a identificar. El caso de la langosta del desierto (*Schistocerca gregaria*) demuestra hasta qué punto son distintas estas estrategias. Una única langosta vive tranquilamente bajo los árboles, en soledad. Pero en cuanto acercamos entre sí a más de tres langostas solitarias, su comportamiento cambia por completo al cabo de unas horas. Se vuelven agresivas y se reúnen, marchan en fila, y luego se ponen a migrar y a volar. También cambian de color y de aspecto, y su descendencia conserva estos atributos, que incluso se refuerzan a lo largo de las generaciones.

Hace unos años, Stephen Simpson, de la Universidad de Sídney, y sus colaboradores intentaron ver si esta transmisión estaba simplemente relacionada con un aprendizaje del comportamiento: ¿habría adquirido la descendencia los mismos atributos que sus padres al aprender a volverse agresivos y a migrar por estar en contacto con ellos? En absoluto: la langosta hembra pone los huevos fecundados sobre la arena y los abandona. En compensación, los deposita con una espuma. Si la hembra se ha transformado antes, la espuma segregada basta para modificar el comportamiento, la forma y el metabolismo de la descendencia. Todos estos cambios los induce una única molécula: una forma de levodopa, precursora de la dopamina (uno de los mensajeros químicos del sistema nervioso). Esta molécula desencadenaría toda una cascada de desarrollo que alteraría la fisiología. Para mí, esto es epigenética: el comportamiento gregario induce en los individuos grandes cambios en la expresión de los genes (a través de una mayor producción de otro mensajero neuronal, la serotonina) y, una vez que se desencadena este mecanismo, la madre lo transmite de una generación a otra sin que esté codificado en los gametos.

¿Pueden heredarse las modificaciones epigenéticas?

V. C.: Nuestras investigaciones y las de otros equipos que trabajan con plantas han establecido sin la menor duda que pueden existir variaciones hereditarias de caracteres sin el más mínimo cambio en la secuencia del ADN. En la planta *Arabidopsis thaliana*, hemos producido una población de individuos que, a pesar de tener el mismo genoma, difieren los unos de los otros por su perfil de metilación del ADN. Hemos observado también que una parte de estas diferencias se transmiten con fidelidad a lo largo de decenas de generaciones, sin que dicha transferencia se deba a ningún tipo de cambio en la secuencia del ADN.

¿Y en los animales?

V. C.: Comenzamos a acumular datos en el gusano *Caenorhabditis elegans*. En estos últimos años, el equipo de Oded Rechavi, de la Universidad de Tel Aviv, ha demostrado que, en respuesta a las diferentes agresiones ambientales, este gusano produce ARN pequeños, y que esta producción se refuerza a lo largo de las generaciones, mientras sea necesario. Un mecanismo de retroacción determina, además, si en la siguiente generación se memorizará o se olvidará esta respuesta epigenética.

E. H.: También hay casos en los ratones que llevan el gen *agouti*, que controla la distribución de la melanina en el pelaje y, por tanto, su color. En los años 2000, Emma Whitelaw, del Instituto de Investigación Médica de Queensland, Robert Waterson, de la Universidad Duke, y sus colaboradores demostraron que era posible inducir un estado de metilación sobre este gen y conservarlo durante varias generaciones. En este caso, la transmisión es metaestable, lo que significa que en la progenie algunos ratones tenían el gen metilado y otros no. Pero al seleccionar los ratones que llevaban el estado deseado, se mantenía el linaje. Si se juega con el régimen alimentario, también puede favorecerse la herencia de este estado.

V. C.: De hecho, la transmisión estable como la obtenida con *Arabidopsis* es un caso extremo. Nuestros trabajos demuestran que existe un campo continuo de posibilidades entre una transmisión muy estable, mendeliana, y las transmisiones muy efímeras.

Precisamente, en la naturaleza, donde tenemos casi de todo, ¿los estados epigenéticos se transmiten durante una cantidad suficiente de generaciones para que pueda actuar la selección natural?



GETTY IMAGES/GLOBALP/ISTOCK

ADAPTARSE AL ENTORNO SOCIAL: Cuando la langosta del desierto (*Schistocerca gregaria*) está sola, vive tranquilamente en el suelo, bajo los árboles, y es más bien pardoverdosa (*izquierda*). Pero si se le acercan otras langostas solitarias, todas cambian de comportamiento y de forma al cabo de unas horas, y se vuelven gregarias y agresivas, y muy coloreadas (*derecha*). Estos cambios se transmiten a las generaciones siguientes a través de una molécula que la madre sintetiza para incluirla en la espuma destinada a nutrir a su progenie.

V. C.: En nuestras investigaciones hemos observado que se transmiten dos estados epigenéticos alternativos al menos durante una veintena de generaciones y, por tanto, pueden dar pie a la selección. Además, lo hemos comprobado: entre las plantas de nuestros experimentos, que tienen todas casi el mismo genoma pero perfiles diferentes de metilación del ADN, hemos seleccionado los fenotipos extremos, como las raíces muy largas o muy cortas. Hemos visto que esta selección estaba muy correlacionada con la presencia de una marca epigenética concreta (ADN metilado frente a ADN sin metilar) en algunos lugares precisos del genoma, en concordancia con una relación causal.

E. H.: Sin embargo, no sabemos si esto funciona así en la naturaleza.

V. C.: Sí, pero la variante que hemos obtenido en el laboratorio existe también en la naturaleza. Por tanto, el gran problema ahora consiste en comprender cómo aparece, incluso antes de preguntarse si se ha seleccionado.

¿Interviene de algún modo la epigenética en las oleadas de mutaciones observadas en la naturaleza?

V. C.: Podría ser, porque acabamos de encontrar una situación como esta en el laboratorio al liberar un transposón de *Arabidopsis*. Los transposones son secuencias de ADN que pueden desplazarse de forma autónoma por el genoma gracias a que contienen genes que codifican enzimas cuya única función es duplicarlos, o cortarlos y pegarlos en otro sitio. Estos elementos móviles y sus vestigios (los transposones que han perdido la movilidad por culpa de las mutaciones) son muy numerosos y están repartidos por todo el genoma. En los humanos, los que se han identificado suponen el 50 por ciento de la secuencia del ADN, aunque sin duda ocupan más del 80 por ciento de nuestro ADN. No obstante, tan solo un pequeño número de ellos (los más recientes) siguen siendo móviles. Pues bien, estos últimos años nos hemos dado cuenta de que los transposones y sus derivados son portadores privilegiados de marcas epigenéticas. En nuestros experimentos, llama la atención que la epigenética transmisible durante generaciones se sustente en la presencia de transposones o de sus vestigios cerca de los genes. De hecho, todo el mundo coincide en que, al menos en los mamíferos y en las plantas, los fenómenos epigenéticos experimentales que parecen pasar de una generación a otra están muy a menudo ligados a la presencia, cerca de un gen dado, de un transposón intacto o fósil. Lo más habitual es que esté metilado (el caso de represión clásica), pero a veces ha perdido la metilación. Quizá la función principal de la epigenética en relación con la evolución sea la de controlar la actividad de estas secuencias móviles y la de limitar su diseminación por el genoma.

¿Se ha observado un control semejante en la naturaleza?

E. H.: Está claro que los transposones atraen la maquinaria epigenética, como las enzimas que metilan el ADN o modifican las histonas. A menudo interviene también el mecanismo de interferencia por ARN, mediante el cual los ARN no codificantes cambian la expresión de los genes. En general, esta maquinaria inactiva los transposones y, con el tiempo, los que no han sido eliminados por la selección natural acaban degenerándose debido a la deriva neutra y a la acumulación de mutaciones. Sin embargo, algunos conservan la capacidad de atraer la maquinaria epigenética y pueden contribuir a la evolución de las redes de regulación génica.

V. C.: Estos vestigios o fósiles constituyen entonces una especie de módulos epigenéticos que se hallan a disposición de los genes cercanos. Hay trabajos muy buenos de Didier Trono, de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne, y de Cedric Feschotte, de la Universidad Cornell, que demuestran que las redes de regulación de la expresión génica en los mamíferos (y, por consiguiente, en los humanos) están en gran parte formadas por tales vestigios, que se encargan de poner todo un conjunto de genes bajo el mismo tipo de control epigenético.

E. H.: Recuperamos así la hipótesis que había formulado Barbara McClintock cuando descubrió los transposones allá por 1950: los consideraba elementos de control de la expresión de los genes, aunque no hablara para nada de la epigenética.

¿Cómo intervendrían estos elementos en las oleadas de mutaciones?

E. H.: Los transposones podrían haber acelerado la evolución. Se sabe que, cuando se altera el control epigenético, como ocurre ante una presión ambiental, ciertos transposones se vuelven a movilizar, lo que da lugar a un período transitorio de inestabilidad genómica. Por ejemplo, un choque térmico hace que la cromatina sea menos compacta, lo que podría desencadenar la movilización de los transposones. En Hawái, donde el vulcanismo crea unas condiciones ambientales más bien hostiles, las especies de *Drosophila* son extraordinariamente numerosas. Los investigadores han barajado la hipótesis de que esta diversificación extrema sería la consecuencia directa de este entorno, que habría favorecido la repetición de las «explosiones» de actividad de los transposones. A su vez, estas explosiones habrían generado la variación genética necesaria para la adaptación a las condiciones del medio y para la especiación.

¿Se tienen pruebas de que exista tal situación, en la que la presión ambiental reactive la movilización de un transposón al perderse su control epigenético?

V. C.: No existen pruebas directas de ello en la naturaleza. Partimos del hecho de que la movilización de los transposones es muy infrecuente y solo se da en situaciones muy peculiares. En cambio, en el laboratorio puede conseguirse al menos que se muevan algunos de ellos cuando se les modifica el control epigenético. De hecho, aunque no sepamos realmente lo que desencadena la pérdida de metilación en las condiciones naturales, lo podemos inducir alterando el funcionamiento de las enzimas que metilan el ADN. Es lo que hemos hecho con nuestras estirpes de *A. thaliana*, ¡y hemos conseguido que algunos transposones empiecen a moverse! Hemos observado que con la movilización de un único transposón se produce

una reacción en cascada. Muy rápido, en tan solo tres o cuatro generaciones, se alcanza una tasa de mutaciones formidable: se crean bastantes más mutaciones con esta movilización que las que aparecen de forma espontánea a causa de errores de replicación del ADN. En resumen, nuestra experiencia nos indica que la desregulación epigenética actúa como un acelerador de la evolución.

¿Y qué pasa después?

V. C.: Al final se pone en marcha el control epigenético por la metilación del ADN, que inactiva de golpe todas las nuevas copias del transposón generadas durante la reacción en cascada. Hemos podido estudiar así el impacto de cada una de estas copias y de su estado epigenético sobre los genes vecinos. Aunque determinadas copias no tengan ningún efecto, otras modifican la expresión de un gen cercano. Ahora bien, entre estas últimas, muchas solo actúan cuando no están metiladas, porque cuando se recupera la metilación, se vuelven inactivas y ya no ejercen efecto alguno.

Sin que haya cambiado la secuencia del ADN...

V. C.: En efecto, ¡no es más que epigenética! Nos hemos dado cuenta también de que el transposón actúa de manera preferente sobre determinados locus, donde los genes están implicados en la respuesta a los cambios ambientales, como los ataques de microorganismos patógenos o los choques térmicos. La mutagénesis inducida por este transposón no es nada aleatoria. Quizá se haya producido una coevolución de numerosos mecanismos: transposones que solo se activan en una situación desfavorable (incluso aunque no sepamos desencadenar su movilidad de esta forma en el laboratorio) y que actúan selectivamente sobre los genes cuya expresión necesita ajustarse con regularidad para responder mejor a las presiones ambientales.

¿Qué sucede en la naturaleza?

V. C.: Después de buscar en la base de datos del proyecto de secuenciación de los 1001 genomas de *A. thaliana*, hemos encontrado una situación similar: una inserción muy reciente en el gen *FLC*, que es un represor clave de la floración [*véase* «Bases moleculares de la floración», por Miguel A. Blázquez, Manuel Piñeiro y Federico Valverde»; Investigación y Ciencia, mayo de 2011]. El ecotipo que posee esta inserción procede de la localidad francesa de Brive, mientras que los otros ecotipos que contienen un gen *FLC* muy parecido, pero sin inserción, se hallan sobre todo en América del Norte, en las regiones con inviernos rigurosos. Hemos observado que todos estos ecotipos florecen después de un episodio invernal (que induce la represión estable del gen *FLC*); solo el ecotipo de Brive, con inviernos más bien clementes, consigue florecer igualmente sin un frío previo cuando se lo somete a un choque térmico. Los trabajos aún preliminares sugieren que, casi con total seguridad, el transposón insertado en el gen *FLC* confiere a este ecotipo la propiedad de florecer así. De hecho, este transposón se desmetila después de un choque térmico, lo que basta, al igual que el frío invernal, para inhibir de manera estable la actividad del gen represor *FLC*.

E. H.: El fenómeno reviste interés de cara al cambio climático u otros rigores ambientales: los transposones crean un reservorio de individuos diferentes que van a reaccionar de manera distinta a una ola de calor o de frío, y así, quizás, no mueran todos.

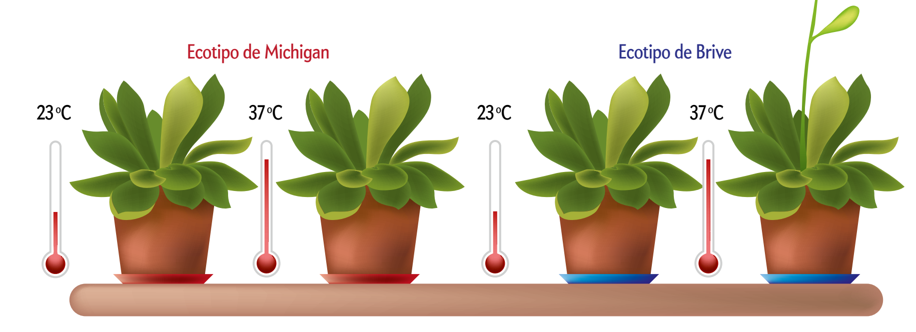
V. C.: Y puede que el choque térmico induzca también las transposiciones —a pesar de que no sepamos verlas— y genere así diversidad genética, como la que provocó Edith en las moscas hawaianas. En este contexto, la evolución implica no pocos cambios de la secuencia del ADN.

A pesar de todo, ¿podemos considerar que la epigenética es un potente motor de la evolución?

V. C.: Sí, pero más bien de manera indirecta, al modular la capacidad que tienen los transposones para ser movilizados, sobre todo en respuesta a los cambios bruscos del entorno, y al permitir así la creación rápida de mutaciones con potencial adaptativo, algunas de las cuales son muy sensibles epigenéticamente. En cualquier caso, es lo que sugiere el ejemplo de la inserción del transposón en el gen *FLC* del ecotipo de Brive.

¿Qué aspectos les parecen especialmente interesantes en las investigaciones actuales sobre la epigenética en relación con la evolución?

E. H.: Una vía interesante atañe a la plasticidad fenotípica, que permite una adaptación rápida y programada a un cambio del entorno, como la de las langostas del desierto en función del número de congéneres cercanos. ¿Cómo consiguen los individuos con el mismo genoma presentar fenotipos tan diferentes según el entorno en el que se encuentran? Todavía se conocen poco las estrategias y los mecanismos implicados. Tanto si se trata de conocer el modo en que un pez cambia la mandíbula en función del alimento disponible, o de cómo la uta, una lagartija, se vuelve negra sobre la lava, seguimos estando lejos de tener una respuesta. No se trata solo de que un gen presente o no un grupo metilo. En realidad, se piensa que la base de la plasticidad fenotípica está en



FLORECER SEGÚN LA TEMPERATURA: El ecotipo de la planta *Arabidopsis thaliana* de Brive lleva un transposón sensible al calor insertado en un gen que controla el momento de la floración. Este transposón está ausente en el gen de las parientes más cercanas del ecotipo de Brive que, como ella, proceden de Michigan y necesitan un período de mucho frío para florecer en primavera. El equipo de Vincent Colot ha demostrado que la presencia del transposón confiere la capacidad de florecer después de un choque térmico. En otras palabras, el transposón, mediante la modulación del control epigenético que el calor ejerce sobre él, habría permitido que el ecotipo de Brive se aclimate a los suaves inviernos de la región.

una fluctuación de la expresión de los genes. En una célula, un gen se expresa con un nivel específico que difiere del de la célula vecina. La epigenética podría contribuir a determinar todo esto.

Por ejemplo, la levadura panadera [organismo unicelular] varía la capacidad de producir esporas en función de la riqueza del medio de cultivo: cuanto más pobre es este, más posibilidades tiene la levadura de esporular. Los biólogos han demostrado que la capacidad para cambiar de estado ya existía en la población de levaduras y han identificado el gen que la confiere. Su expresión fluctúa mucho de una célula a otra y, en consecuencia, no todas esporulan a la vez. También han demostrado que el estado de la cromatina en torno a la región donde comienza la lectura del gen varía entre las células, y que ello produce cambios en la expresión del gen. La ventaja se sitúa aquí en el nivel de la población: las células que no han iniciado aún la esporulación pueden tomar el relevo si son devueltas a un medio rico en nutrientes. Por lo que sé, se trata de uno de los pocos casos de plasticidad fenotípica en los que se conoce el gen y el mecanismo.



ADOPTAR EL COLOR DEL SUELO: La uta, una lagartija del suroeste de Estados Unidos, suele tener el color de la arena sobre la que habita (*izquierda*). Pero las que viven sobre el volcán Pisgah, en California, son negras como la lava (*izquierda*). Si una lagartija de Pisgah vive durante cuatro meses en una arena clara, retoma el color arenoso. El equipo de Ammon Corl, de la Universidad de California en Berkeley, ha demostrado que, en las lagartijas de Pisgah, dos genes que regulan la producción de melanina están mutados. Según ellos, la plasticidad fenotípica de la uta le ayuda a adaptarse a un nuevo medio y, luego, una mutación sometida a una fuerte selección positiva acaba por fijar el fenotipo mejor adaptado.

¿Qué otro aspecto les parece particularmente importante en estos momentos?

E. H.: La función última de los transposones y de sus vestigios en la adaptabilidad; hasta qué punto estas inserciones sirven de moduladores de la expresión de los genes y son totalmente esenciales para la adaptación a entornos diferentes. Las plantas quizá sean ejemplos más llamativos que los animales, porque se ven obligadas a aprovechar lo que tienen, mientras que los animales pueden desplazarse.

V. C.: Sí, y sería importante, en concreto, conocer las modalidades que gobiernan la relajación del control epigenético y la movilización de los transposones, y cómo se inscribe todo esto en un proceso que favorecería la creación de mutaciones adaptativas en respuesta a los cambios extremos del entorno.

Entonces, con respecto a los planteamientos de Lamarck y Darwin, ¿estamos finalmente un poco entre los dos?

V. C.: Podemos decir lo que nos venga en gana de Lamarck. Pero si acabamos aceptando que el entorno puede actuar no solo como un filtro, sino también como un motor en la generación de la variación genética, y que además es como un orientador (imperfecto) de esta, el acercamiento se vuelve interesante.

E. H.: Una cuestión que nos planteamos a menudo es la siguiente: ¿puede un organismo adquirir rasgos hereditarios, como proponía Lamarck? La respuesta es no. En cambio, como sugirió la bióloga evolutiva estadounidense Mary Jane West-Eberhard en 2003 apoyándose en sus trabajos sobre las avispas y las mariposas, la plasticidad fenotípica podría abrir el camino a los ajustes permanentes, bajo la forma de cambios genéticos. Lamarck tenía razón al decir que hacían falta respuestas flexibles y rápidas al entorno —del mismo modo que esta plasticidad fenotípica podría ser el motor de cambios más remotos—, pero si determinados rasgos adaptativos se vuelven permanentes, como en el caso del color negro de las utas, es porque las mutaciones (¿quizás ligadas a la actividad de los transposones?) han fijado estos rasgos que hasta entonces eran plásticos. Hablamos de asimilación genética. Por lo tanto, las mutaciones son los motores últimos de la evolución. IyC

Marie-Neige Cordonnier, doctora en biofísica molecular, es subdirectora editorial de Pour la Science, *revista francesa de divulgación científica.*

PARA SABER MÁS

Transgenerational epigenetic inheritance: Myths and mechanisms. Edith Heard y Robert A. Martienssen en *Cell*, vol. 151, n.º 1, págs. 95-109, marzo de 2014.
Transposon accumulation lines uncover histone H2A.Z-driven integration bias towards environmentally responsive genes. Leandro Quadrana et al. en *Biorxiv*, octubre de 2018.
Advances in epigenetics link genetics to the environment and disease. Giacomo Cavalli y Edith Heard en *Nature*, vol. 571, págs. 489-499, julio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Un nuevo tipo de herencia. Michael K. Skinner en *IyC*, octubre de 2014.



EN SÍNTESIS

El ADN posee muchas virtudes que hacen de él un candidato ideal para albergar no solo el código genético, sino también información de otro tipo, si bien aún no es capaz de reemplazar a las memorias electrónicas tradicionales, como el disco duro.

Gracias a los avances en los métodos de secuenciación, comienza a ser utilizado como grabadora molecular para generar datos a velocidades sin precedentes, en campos como la ingeniería química.

De este modo, el ADN sirve para «leer» y «escribir» información. Este avance podría tener una gran repercusión en el desarrollo de nuevos fármacos y en el tratamiento de las enfermedades.

BIOTECNOLOGÍA

UN ARCHIVO UNIVERSAL QUE CABRÍA EN UN HUEVO

El ADN se convierte en un soporte de almacenamiento y generación de información a escala astronómica

James E. Dahlman



DAN SAELINGER

MILES DE MILLONES DE AÑOS ANTES DE QUE EL INGENIO HUmano ideara el disco duro, la evolución eligió la molécula del ADN para albergar su información más preciada: el código genético. Con el tiempo, sirvió tan bien a tal propósito que hoy es omnipresente en los seres vivos de la Tierra. Gracias a los avances en la «lectura» y la «escritura» de su secuencia, esta molécula ancestral está siendo acondicionada como archivo para otra nueva clase de información, la generada por la humanidad, que en esta era de los macrodatos crece a un ritmo exponencial.



James E. Dahlman es profesor adjunto en el Departamento Wallace H. Coulter de Ingeniería Biomédica del Instituto Tecnológico de Georgia y la Universidad Emory. Su laboratorio trabaja en los ámbitos de la administración de fármacos, la nanotecnología, la genómica y la edición de genes.

La idea de rediseñar el ADN como soporte de información ajena al código genético ha sido debatida largo y tendido. Al fin y al cabo, los 0 y 1 de la informática empiezan a topar con los límites de la física. Uno de los retos que plantea el almacenamiento seguro de los datos que creamos se puso en evidencia no hace mucho, cuando Myspace —antaño la red social más popular— anunció que durante una migración de servidores quizá se hubiera perdido de forma irreparable una década de datos. La salvaguarda a largo plazo, como la de los sitios web que han pasado por un período de inactividad, deja al descubierto las vulnerabilidades e imperfecciones de las tecnologías del presente. Y no se trata de un mero problema de espacio: el mantenimiento de los datos almacenados consume grandes cantidades de energía.

Con sus propiedades, el ADN podría sortear todas esas dificultades. En primer lugar, su estructura de doble hélice se presta a la recogida de información, pues si se conoce la secuencia de nucleótidos de una de las dos hebras, la otra queda definida de manera automática. Además, la molécula permanece estable largo tiempo, virtud que permite preservar la integridad y la fidelidad de la información. En 2017 se analizaron muestras de ADN extraídas de restos humanos de 8100 años de antigüedad, un lapso durante el cual no permanecieron conservados en condiciones ideales. Si el ADN se conserva en un ambiente frío y seco, perdurará casi con certeza cientos de siglos.

Quizás el aspecto más interesante de la doble hélice sea su extraordinaria capacidad de plegamiento y empaquetamiento. Cada célula humana alberga un núcleo con un diámetro cercano a 0,00001 metros. Si el ADN contenido en ese núcleo se estirase, tendría dos metros de largo. Visto de otra forma: si se concatenaran las hebras de ADN contenidas en todas las células del cuerpo, se extenderían unos 100.000 millones de kilómetros. En 2014 se calculó que un solo gramo podría albergar en teoría 455 exaoctetos de datos, una densidad de almacenamiento un millón de veces superior a la de un disco duro.

Si bien ya se lo considera un medio de almacenamiento, quedan por superar importantes trabas de carácter científico, económico y ético para que el ADN pueda reemplazar a los discos duros tradicionales. En el ínterin, la doble hélice, vista como un nuevo soporte de información, encuentra usos cada vez más amplios e inmediatos. En el código genético que conforma se han grabado viejas películas de Hollywood y preservado los clásicos, en lugar de en un frágil microfilm. Y en fecha más reciente se ha empleado como herramienta para diseñar terapias genéticas más seguras, acelerar el desarrollo de fármacos contra el cáncer e incluso llevar a cabo la que quizá sea la primera «transmisión en directo» genética de un organismo vivo. En las fronteras de este campo en evolución, no solo se persigue el almacenamiento duradero, sino facilitar la generación de datos a velocidades nunca vistas. Ello es posible porque la molécula de ADN es más escalable que ninguna otra en los dos sentidos: incrementa drásticamente la cantidad generada de datos y, al mismo tiempo, reduce los recursos necesarios para su almacenamiento.

ACELERACIÓN DE LA CREACIÓN DE NUEVAS NANOPARTÍCULAS

En los últimos años, los científicos han recurrido cada vez más a «grabadoras moleculares» como instrumento para interpretar y mantener un registro de los resultados experimentales. En muchos casos, este proceso involucra un código de barras de ADN: una secuencia de nucleótidos conocida que hace las veces de etiqueta molecular, con la cual se marca el resultado de un experimento para que sea recuperable. Uno de los resultados se vincularía a la secuencia ACTATC, otro a la secuencia TCTGAT, por ejemplo, y así sucesivamente.

Tales códigos de barras circulan desde inicios de la década de 1990, cuando Richard Lerner y el difunto Sydney Brenner, por entonces en el Instituto de Investigación Scripps, propusieron su uso como método para el seguimiento de reacciones químicas. Era este un concepto tremendamente innovador, adelantado a su época: no se habían ideado aún las tecnologías para leer el ADN con rapidez y economía. Nadie reparó en sus posibilidades hasta que las aportaciones de numerosos científicos en los campos de la química de los nucleótidos, los sistemas microfluídicos y otras diversas metodologías posibilitaron la llamada secuenciación de nueva generación. En 2005 tuvo lugar un avance crucial con la presentación de un secuenciador capaz de analizar 25 millones de bases de ADN en solo cuatro horas.

La secuenciación de nueva generación no cesa de mejorar su rendimiento a pasos acelerados, de modo que ahora es fácil leer millones de secuencias de ADN al unísono, lo que hace posible emprender miles de experimentos de manera simultánea. El análisis de estos experimentos con códigos de barras genéticos por medio de la secuenciación constituye en sí una modalidad de la gestión de datos: en lugar de examinar ideas de una en una, un equipo científico puede plantear 20.000 predicciones y evaluarlas todas para averiguar cuál es la correcta.

Los biólogos fueron los primeros en recurrir masivamente a los códigos de barras genéticos. Pero la accesibilidad de esta técnica ha permitido que investigadores de numerosos ámbitos, como la ingeniería química y la ciencia de materiales, lleven a cabo experimentos a escalas totalmente nuevas. Sin ir más lejos, en mi laboratorio del Instituto Tecnológico de Georgia, los ingenieros emplean esas etiquetas de ADN para perfeccionar el diseño y el funcionamiento de nanopartículas destinadas a administrar fármacos de forma segura a las células enfermas. Cabría pensar que la nanotecnología, que en buena parte se sustenta en la física y la ingeniería química, no guarda relación alguna con el ADN, pero cuando este se considera un medio de almacenamiento y recuperación de información de todo tipo, su utilidad como herramienta organizativa salta a la vista.

Uno de los problemas fundamentales que afrontan los nanotecnólogos radica en que el diseño de los experimentos que buscan tratamientos eficaces sigue siendo mucho más fácil que su ejecución y ulterior análisis. Ello se debe a que la forma, el tamaño, la carga, la composición química y otras muchas variables propias de las nanopartículas influyen en la eficacia con que estas liberan los fármacos en las células enfermas. Además, todos esos factores interactúan entre sí, por lo que resulta difícil predecir qué nanopartícula liberará su contenido de manera más selectiva. Una solución obvia consiste en evaluar cada alternativa una a una, pero sacar adelante un proyecto de esa naturaleza puede exigir inversiones de cientos de millones de euros, según se desprende de los datos de las farmacéuticas que han desarrollado nanopartículas para fármacos basados en ARN.

Es ahí donde el ADN, con su capacidad de almacenamiento de información, puede lograr grandes progresos. A fin de aumentar el número de nanopartículas susceptibles de someter a prueba, diseñamos miles con estructuras químicas variadas (esferas grandes con carga positiva o triángulos pequeños eléctricamente neutros, entre otras) y asignamos a cada una un código de barras de ADN.

La nanopartícula A, dotada de la estructura química A, incorpora el código de barras A; a la nanopartícula B, con la estructura B, le corresponde el código B. Repetimos este proceso de marcación tantas veces como fue necesario y creamos así multitud de nanopartículas distintas, cada una con su propia y exclusiva etiqueta molecular de ADN. Pudimos entonces dirigir cientos de esas partículas a las células enfermas. Y para saber cuál liberaba más eficazmente el fármaco, cuantificamos los códigos de barras ubicados dentro de las células mediante técnicas de secuenciación del ADN.

La escala de tales ensayos no tiene precedentes en la nanomedicina. Un ensayo «ordinario» en mi campo genera entre uno y cinco puntos de datos. Mi laboratorio esperaba cuantificar a finales del año pasado cómo 500 nanopartículas distintas administran terapias genéticas a 40 tipos de células, lo cual equivaldría a 20.000 experimentos simultáneos.

Necesitábamos, pues, un procedimiento de análisis que fuera capaz de controlar la calidad de los datos y que, al mismo tiempo, ayudase a evaluar estadísticamente los resultados. Así que, en primer lugar, calibramos la capacidad para predecir los resultados de un experimento repetido. Una vez que supimos que los grandes volúmenes de datos de que disponíamos eran fiables, emprendimos un estudio estadístico para indagar si ciertas características de las nanopartículas, como el tamaño, afectaban a la liberación de los fármacos en los tejidos deseados. Resulta que esta viene dictada por la química de la nanopartícula, no por su tamaño. De ese modo, esperamos acelerar el descubrimiento de genoterapias seguras invirtiendo menos recursos. Una de las metas estriba en hallar una nanopartícula que administre específicamente terapias de ese tipo que ayuden a destruir los tumores y reduzcan los efectos secundarios de los tratamientos actuales, como las náuseas o la alopecia.

Ya hemos cosechado ciertos éxitos. En 2018, gracias a los vastos conjuntos de datos generados en experimentos con códigos de barras, no tardamos en descubrir nuevas nanopartículas capaces de administrar genoterapias a las células del endotelio que tapiza el interior de los vasos sanguíneos, así como a varias células inmunitarias, encargadas de dirigir la respuesta contra las enfermedades. Este hallazgo podría transformar la terapéutica, pues permitiría modificar la actividad de las proteínas en células inmunitarias que por ahora son «inmedicables»; es decir, difíciles de atacar con anticuerpos o con moléculas pequeñas con actividad farmacológica. A raíz de los datos publicados en 2018 y 2019 en revistas como *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, *Advanced Materials* y *Journal of the American Chemical Society*, nos vimos desbordados por el interés que despertó en otros terapeutas genéticos, pero eso nos permitió fundar GuideRx, una empresa de códigos de barras dedicada al desarrollo de genoterapias seguras.

Hoy los códigos de barras de ADN son tan habituales que se aplican de diversas formas en un mismo campo. Un ejemplo lo constituye la biología del cáncer, disciplina que estudia el papel de las mutaciones genéticas y el modo de acción de los nuevos fármacos. La resistencia a los medicamentos continúa siendo un problema importante: a menudo el paciente responde inicialmente al medicamento, pero acaba recayendo porque este pierde su capacidad para matar las células tumorales.

En el laboratorio de Todd Golub, en la Universidad Harvard, se han usado códigos de barras de ADN para estudiar dicha resistencia. En 2016, sus miembros describieron la inserción directa y permanente de una etiqueta en el genoma de células cancerosas a través de un virus. Una célula de tipo A recibió la secuencia A; otra de tipo B recibió el código B, y así sucesivamente. Las distintas células se mezclaron, se cultivaron en placas y fueron tratadas con un medicamento contra el cáncer.

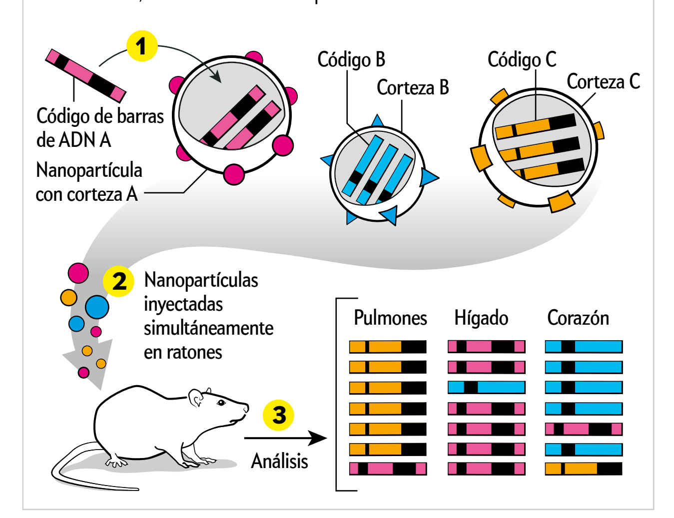
Si el fármaco mata la célula o frena su crecimiento, esta no se dividirá. Si, en cambio, adquiere resistencia al fármaco, se multiplicará. Así pues, la abundancia relativa de la secuencia A aumentará con el tiempo si la célula de tipo A se vuelve resistente o, por el contrario, disminuirá si muere. Al secuenciar todos los códigos de barras de las células supervivientes a lo largo del tiempo, el laboratorio cuantificó de forma simultánea las respuestas de los diversos tipos celulares.

Ese mismo año, el laboratorio de Monte Winslow, en la Universidad Stanford, recurrió a estirpes de células pancreáticas

CÓMO FUNCIONA

Rastreo de nanopartículas con etiquetas de ADN

Los códigos de barras de ADN permiten probar con más facilidad las nanopartículas diseñadas para la administración de fármacos. Antes, el proceso era laborioso y consumía mucho tiempo; ahora es posible probar a la vez cientos de partículas con características diversas. Como se muestra aquí, durante la fase de ensayo se introduce una etiqueta molecular única en cada tipo de corteza **1**. Estas nanopartículas, que acabarán transportando las sustancias terapéuticas hasta las células enfermas, se administran de forma simultánea para estudiar su comportamiento **2**. Más tarde, las células se examinan en busca de los códigos de ADN para ver qué nanopartículas han conseguido acceder a cada tejido **3**, así se puede saber con rapidez qué diseños serían los más convenientes para la liberación dirigida de diversos fármacos, minimizando a la par los efectos secundarios.



FUENTE: «A DIRECT COMPARISON OF IN VITRO AND IN VIVO NUCLEIC ACID DELIVERY MEDIATED BY HUNDREDS OF NANOPARTICLES REVEALS A WEAK CORRELATION», KALINA PAUNOVSKA ET AL., EN *NANO LETTERS*, VOL. 18, N.º 3, 14 DE MARZO DE 2018; JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)

marcadas con códigos de barras genéticos para descubrir medicamentos que impidieran la propagación del tumor en forma de metástasis. Cada estirpe se etiquetó con un virus y luego se cultivó en pocillos separados, a cada uno de los cuales se le añadió un fármaco antitumoral, que de este modo quedó asociado a un código de barras. Inmediatamente después se inyectaron las células en el torrente sanguíneo y más tarde se averiguó cuáles se extendían a los pulmones. En virtud de la abundancia o la escasez de los códigos de barras, los investigadores dedujeron qué medicamentos estimulaban o impedían la metástasis.

En un tercer ejemplo, un equipo del Instituto Broad del Instituto Tecnológico de Massachusetts y de la Universidad Harvard empleó códigos de barras para estudiar el efecto del genoma sobre un único cáncer. Primero cultivaron un gran número de células y las sembraron en una placa. A continuación, inactivaron o activaron alternativamente uno a uno todos los genes del genoma por medio de un sistema de edición génica. La secuencia del gen cuya expresión se había modulado actuaba como código de barras. Al tratar las células con un medicamento antitumoral y secuenciar el ADN a lo largo del tiempo averiguaron cómo afectaba cada gen del genoma a la resistencia a los medicamentos.

En las aplicaciones descritas, la molécula de ADN actúa a la par como un generador de datos, necesaria como es para efectuar simultáneamente todos los experimentos, y como un repositorio, pues las etiquetas moleculares se analizan mediante la secuenciación de nueva generación. Las implicaciones son asombrosas: será posible aplicar las mismas técnicas tanto a las enfermedades autoinmunitarias o neurológicas como a las cardiovasculares. Las enormes posibilidades de los códigos de barras de ADN pueden entenderse con un ejercicio sencillo. Sustitúyase en los ejemplos citados la palabra «cáncer» por otra enfermedad, o el término «resistencia» por la respuesta farmacológica que se desee. El etiquetado con ADN se convierte así en un elemento clave para agilizar el desarrollo inicial de fármacos y la búsqueda de tratamientos en general.

LECTURA CONTRA ESCRITURA

Los códigos de barras genéticos se basan en la «lectura» de secuencias de ADN conocidas. Hasta hace poco, empero, era casi imposible «escribir» secuencias de ADN. En términos generales, considero la escritura como la conversión deliberada de otras formas de información —como fotografías, películas o estados biológicos— en secuencias de ADN que pueden guardarse y leerse más adelante. Muchas de las nuevas técnicas de escritura se sustentan en los sistemas de edición de genes derivados de CRISPR (siglas en inglés de «repeticiones palindrómicas cortas, agrupadas y separadas por intervalos regulares»). El diseño racional de un sistema CRISPR permite escribir secuencias de ADN.

Diversos avances recientes aprovechan la forma en que los sistemas CRISPR evolucionaron de manera natural como arma de defensa de las bacterias contra el ataque de los virus. Estos se fijan a la superficie de la bacteria y luego inyectan en el interior su ADN o ARN. Con el fin de «recordar» al intruso para reconocerlo en el futuro, las bacterias desarrollaron los sistemas CRISPR, que reconocen el ADN o el ARN del virus e insertan pequeños fragmentos de este en su propio genoma (este segundo convertido previamente en ADN). En otras palabras, las bacterias «escriben» o «graban» un historial de los virus que las han atacado para defenderse de ellos en el futuro.

Aprovechando este mecanismo, Seth Shipman, antes en el laboratorio del genetista de Harvard George Church y ahora en la Universidad de California en San Francisco, usó un sistema CRISPR para grabar directamente imágenes de una mano humana en el genoma de la bacteria *Escherichia coli*. Para acometer esta tarea, Shipman y sus colaboradores expresaron en primer lugar dos proteínas, Cas1 y Cas2, que juntas capturan nucleótidos de ADN y los insertan en el genoma. A continuación, «alimentaron» a *E. coli* con secuencias de ADN que codificaban píxeles que —cuando se secuenciaban juntos— creaban la imagen de una mano. Para ello, el equipo debía asignar diferentes matices de información al ADN. Por ejemplo, en un caso, cada base A, C, G y T representaba un color distinto del píxel, mientras que una etiqueta de ADN asociada codificaba la posición del píxel en la imagen completa.

La imagen original se pudo reconstruir con una precisión superior al 90 por ciento secuenciando el ADN de *E. coli*. A continuación, el experimento se repitió con una variación importante: el ADN se añadió en diferentes momentos acompañado de un método que analizaba la posición relativa de cada una de las secuencias de ADN grabadas con respecto a las demás. Midiendo en qué momento se incorporaban las secuencias al genoma de la bacteria se pudo crear una sucesión de imágenes; es decir, se codificó una película. Los investigadores grabaron un GIF de una parte de la escena filmada por Eadweard Muybridge en 1878, en la que se veía un caballo al galope. En un artículo de 2017, mostraron que habían reconstituido esa famosa película mediante la secuenciación del genoma bacteriano.

Más recientemente, científicos del laboratorio de Randall Platt en el Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zúrich (ETH) lograron un descubrimiento fundamental que amplía aún más esta clase de métodos al fijar como objetivo el ARN mensajero, un pariente clave del ADN. En lugar de grabar imágenes codificadas por secuencias de ADN artificiales, se sirvieron del sistema CRISPR de otra bacteria para generar las denominadas «grabaciones en vivo» de la expresión natural del ARNm en bacterias. El conjunto de los ARNm de la célula dicta qué proteínas se sintetizan y, por lo tanto, rige todas las funciones celulares.



LA DOBLE HÉLICE DEL ADN constituye un soporte ideal para el almacenamiento de información, pero de momento no ha logrado desbancar a los discos duros tradicionales.

GETTY IMAGES

Para grabar la producción del ARNm en diferentes instantes, en el laboratorio de Platt se seleccionaron primero proteínas Cas (vinculadas a CRISPR) procedentes de muchas cepas bacterianas. Descubrieron entre ellas algunas capaces de convertir el ARNm natural en ADN y codificarlo en el genoma: las proteínas Cas1 y Cas2 de la bacteria *Fusicatenibacter saccharivorans* poseían tal capacidad. En una serie de elegantes estudios con virus especializados, el equipo demostró en 2018 que las células registraban con precisión si habían estado expuestas a estrés oxidativo, condiciones ácidas o incluso herbicidas.

Estos resultados suscitaron un gran entusiasmo, pues indicaban que los genes expresados de ordinario por una célula en un momento dado pueden quedar grabados en el genoma para su análisis posterior. Dado que el laboratorio de Platt continúa perfeccionando la técnica, es cada vez más factible que la grabación celular se convierta en algo corriente. Semejante avance permitiría indagar en el proceso de transformación tumoral de la célula, en cómo responde esta a la infección a lo largo del tiempo e incluso en su envejecimiento natural.

LA UBICUIDAD DEL ALMACENAMIENTO EN EL ADN

En vista de su uso como fuente de generación, almacenamiento y recuperación de información en un número creciente de campos, cabe preguntarse si, con el tiempo, las moléculas de ADN llegarán a competir algún día con las memorias electrónicas convencionales como soporte para conservar todos los datos digitales que genera la humanidad. Por ahora, la respuesta es no: los discos duros y las memorias flash guardan mejor la información que los sistemas de ADN más avanzados.

Ahora bien, como con cualquier otra tecnología, las memorias electrónicas presentan limitaciones. Ocupan espacio y requieren condiciones ambientales concretas; hasta las más duraderas tienen pocas expectativas de sobrevivir más allá de unas décadas. Ante estos problemas, tal vez pronto resulte difícil mantener todos los datos que generamos hoy.

En contraste, es casi seguro que el ADN perduraría cientos de siglos si se conservase en las condiciones de frío y humedad adecuadas. Ya se guarda habitualmente a –20 o incluso a –80 grados centígrados en laboratorios criogénicos, equipados para mantener temperaturas sumamente bajas; pero también resiste las condiciones tórridas, que los aparatos electrónicos ordinarios no soportan. En 2015, Robert Grass y Wendelin Stark, ambos en el ETH de Zúrich, demostraron que el ADN almacenado en sílice es capaz de soportar hasta 70 grados centígrados durante una semana sin que se produzcan errores. Y aunque los discos duros pueden alojar hasta un teraocteto por pulgada cuadrada, cálculos recientes indican que, en teoría, toda la información generada en el mundo entero cabría en menos de un kilogramo de ADN.

Aún persisten importantes retos técnicos que habrá que superar para que el almacenamiento en ADN se convierta en algo cotidiano. La principal limitación radica en que guardar la información no es igual que recuperarla. Los datos guardados en un disco duro se obtienen casi al instante; extraerlos del ADN requiere la secuenciación de este, un proceso que en la actualidad tarda desde unos minutos a un día. A pesar de los enormes avances acaecidos en los últimos años en materia de secuenciadores, continúan siendo grandes y caros en comparación con un disco duro.

Y esos no son los únicos obstáculos que habrá que vencer para que el almacenamiento en ADN alcance todo su potencial. Como sociedad, hemos de reconocer que la ubicuidad de la secuenciación del ADN también hará aún más fácil seguir el rastro de las personas, a la par que creará nuevas vulnerabilidades en la seguridad de los datos. Abundan ya los casos que vulneran la intimidad, tanto en Estados Unidos como en el resto del mundo.

La policía estadounidense ya recurre a la secuenciación del ADN, apenas sin supervisión. Con las muestras de ADN que se piden a los detenidos, incluso a los que cometen delitos menores, se están compilando grandes bancos de información genética. Algunos argumentan que se trata del equivalente en el siglo XXI de las huellas dactilares, pero existe una diferencia esencial. Estas identifican solo a un individuo; en cambio, si una persona proporciona una muestra de su ADN, está facilitando información que permite identificar a cualquier miembro de su familia. En China, con el pretexto de un programa de salud, los funcionarios han recopilado información genética de casi 36 millones de ciudadanos, un colectivo que incluye a muchos uigures (miembros de un grupo étnico musulmán que sufre discriminación). No está claro a qué fines destinará el Gobierno esos datos.

De momento, las inquietudes sobre el almacenamiento en el ADN giran en torno al código genético del individuo; es decir, el debate se centra en la protección de la identidad. Pero si en el futuro acabase almacenando otro tipo de datos, como información médica, contratos legales o historiales personales digitales, tal situación abriría nuevos interrogantes sobre la vulnerabilidad del almacenamiento en cuanto a la seguridad, tanto física como cibernética. Dada la ingente cantidad de información que puede ser almacenada en tan reducido espacio, ¿cómo se distribuirán los datos para evitar su concentración en un solo lugar? Y aunque la extracción se pueda refinar, ¿cómo se accederá a ellos sin exponerlos a ataques maliciosos o a pérdidas accidentales?

Causa desaliento pensar en la ardua labor, científica y ética, que ha de acometerse. Me gusta recordar a los hermanos Wright, porque crecí en la misma localidad de Ohio que ellos. En su primer vuelo de 12 segundos recorrieron 37 metros. Sesenta y seis años más tarde, sin las ventajas de la computación moderna, el hombre puso el pie en la Luna. Semejante hazaña alimenta mi optimismo de que seremos capaces de aprovechar el poder natural del ADN en las décadas venideras y, si admitimos sin ambages sus aspectos negativos, creo que podremos garantizar que se utilice esencialmente para bien. IyC

PARA SABER MÁS

Next-generation digital information storage in DNA. George M. Church et al. en *Science*, vol. 337, pág. 1628, septiembre de 2012.
High-throughput in vivo screen of functional mRNA delivery identifies nanoparticles for endothelial cell gene editing. Cory D. Sago et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 115, n.º 42, págs. E9944–E9952, octubre de 2018.
Transcriptional recording by CRISPR spacer acquisition from RNA. Florian Schmidt et al. en *Nature*, vol. 562, págs. 380–385, octubre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Computación con ADN. Leonard M. Adleman en *IyC*, octubre de 1998.
Computadores de ADN. Ehud Shapiro y Yaakov Benenson en *IyC*, julio de 2006.
Computadoras de ADN para el trabajo y el juego. Joanne Macdonald, Darko Stefanovic y Milan N. Stojanovic en *IyC*, febrero de 2009.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Carbono: el elemento estrella

Este elemento químico es tan interesante que merece la pena sistematizar su estudio, atesorar muestras de sus diversísimas manifestaciones y materializar una maleta didáctica

Siguiendo la estela del recién concluido Año Internacional de la Tabla Periódica, nos centramos aquí en un elemento químico que ya ha protagonizado algunas entregas de esta sección. Nos referimos al carbono, una sustancia simple cuyas aplicaciones se extienden en casi todos los ámbitos de la actividad humana. Nuestro objetivo: convertirlo en materia pedagógica mediante la elaboración de una «maleta didáctica».

Una maleta didáctica —un recurso que los docentes usan desde hace años— se define como un contenedor donde se alojan todos los elementos necesarios para el desarrollo de una actividad didáctica. Lo primero que tendremos que hacer, pues, será diseñar la actividad, es decir, definir el tema de estudio, las preguntas, los experimentos, los materiales y todo aquello que necesitemos para hacer accesible el conocimiento que nos hemos propuesto trabajar. (En la enseñanza primaria, unos de los mejores recursos didácticos son los juegos, los relatos y los retos.) Naturalmente, el contenido de la maleta dependerá del ámbito de conocimiento que queramos trabajar. Si vamos a introducirnos en la prehistoria, necesitaremos réplicas de herramientas, materiales y productos técnicos de la época. Si nuestro objetivo es trabajar un ámbito artístico, en cambio, buscaremos pigmentos, soportes, fichas de artistas o grabaciones con piezas musicales escogidas.



Las maletas pedagógicas constituyen un retorno al aula de la materia tangible, algo que, por desgracia, había quedado olvidado, pero que muy diversos actores han puesto de nuevo sobre la mesa. Así, grandes museos, centros de investigación, fundaciones privadas y centros de recursos pedagógicos disponen hoy de una amplia oferta de maletas que ceden gustosamente al profesorado para que trabaje con sus alumnos la nanotecnología, la física o el modernismo.

Siguiendo esta línea, hoy proponemos la elaboración de una maleta didáctica donde alojaremos todo lo necesario para trabajar el carbono como elemento químico y sus múltiples derivadas curriculares. Lo haremos como en la colaboración dedicada al coleccionismo de elementos químicos, es decir, buscando fuentes de obtención, muestras en estado puro y materiales que nos expliquen sus aplicaciones [*véase* «El arte de coleccionar elementos químicos», por Marc Boada Ferrer; Investigación y Ciencia, julio de 2019]. Todo ello, además, lo enriqueceremos con varios materiales que nos ayudarán a construir un discurso y, sobre todo, a hacer pensar a nuestros alumnos.

MARC BOADA FERRER (*fotografías*)



Empecemos. ¿Dónde está el carbono? ¿Dónde lo encontramos? La respuesta es obvia: en la naturaleza. Si echamos un vistazo al planeta, comprobaremos que el carbono está en todas partes como sustancia elemental o combinado. Las montañas calcáreas están hechas de carbonato cálcico, un compuesto que, en estado de extrema pureza, recibe el nombre de calcita y puede llegar a presentar una birrefringencia (doble refracción) espectacular, como muestra la variedad denominada espato de Islandia 1a.

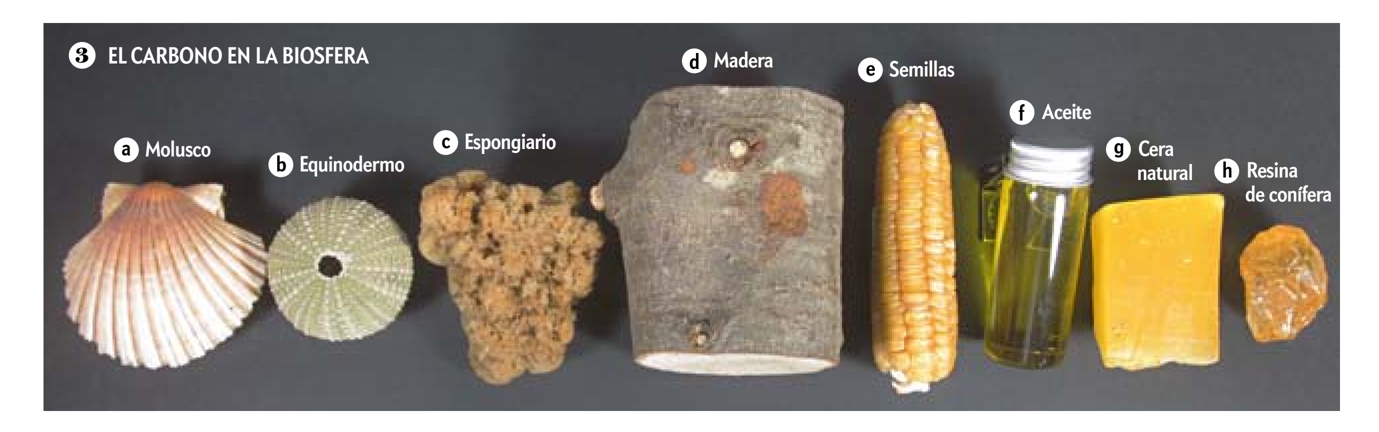
Vayamos ahora a por el carbono puro. Si de muestras prístinas se trata, la más prestigiosa es, sin duda, el diamante. Aquí lo vemos montado sobre una muestra de kimberlita 1b, la roca volcánica donde crecieron estos durísimos y onerosos cristales. Más barato, pero de idéntica composición química, es el grafito 1c; este aparece en extensas minas cuya explotación da lugar a toda una industria que más adelante desarrollaremos.

Radicalmente distinto es otro mineral que nos permite introducir un tema colateral, la shunguita 1d, un mineraloide de carbono casi puro, nada cristalizado y de grafitización imposible. Sorprendentemente, esta piedra ha sido incluida entre los minerales de «la nueva era». Unas supuestas propiedades terapéuticas y la capacidad —nunca demostrada— de captar las radiaciones electromagnéticas han convertido a esta piedra en objeto de interés para las más variadas pseudociencias. Esta forma amorfa o vítrea de carbono, próxima en sus propiedades técnicas al azabache (no mostrado), procede de la lejana región de Carelia, en Rusia, y las dataciones sugieren que su antigüedad se acerca a los 2000 millones de años. Representa quizá la primera muestra de carbono biogénico; en su interior se han hallado trazas de fullerenos (moléculas esféricas de carbono compuestas de decenas de átomos).

También de origen orgánico son los combustibles fósiles ricos en carbono, que aquí ejemplificamos con un tronco fosilizado del Cretácico superior 1e. Un destino que quizá sufrirán algunos de los vegetales que pueblan hoy la superficie del planeta, como estos restos arbóreos que aún hoy tienen múltiples usos en el tercer mundo 1f.

Pero el carbono no lo encontramos solo en la geosfera y la biosfera. También podemos descubrirlo en el espacio exterior, ya que ese es su origen último. Recordemos que los elementos químicos se sintetizan en procesos estelares y que el carbono, en concreto, se ha generado en las reacciones nucleares que tienen lugar en las estrellas de baja masa y en la explosión de estrellas masivas. Es por ello por lo que,





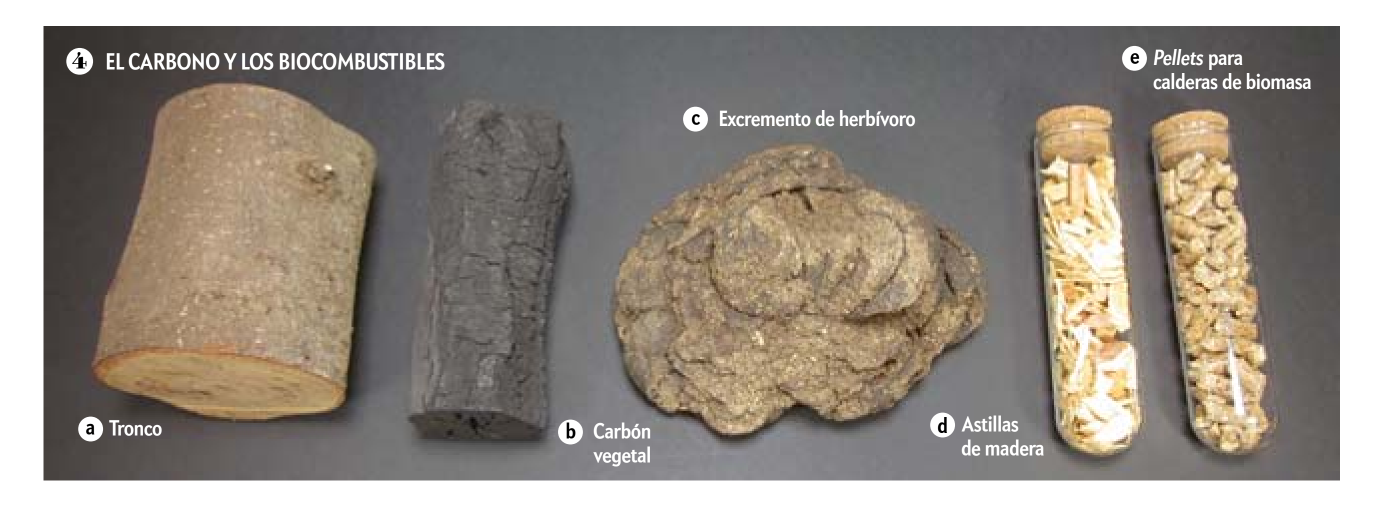
de vez en cuando, un meteorito rico en carbono aterriza en la Tierra portando en su interior incluso algunos aminoácidos. Es el caso de esta condrita carbonácea **1g**, donde, además, podemos ver unas blancas partículas de óxidos de calcio y aluminio que corresponden, nada más y nada menos, que a restos casi inmaculados de la nebulosa que dio origen al sistema solar.

Pasemos ahora a los aspectos económicos y energéticos ligados al carbono. Los combustibles fósiles han sido el motor de nuestra especie y los perseguimos sin descanso. El proceso empieza con el enterramiento anaeróbico de los restos vegetales, como este tronco de roble **2a** procedente de un yacimiento arqueológico más antiguo que las pirámides de Egipto. Una presión reducida y una baja temperatura transforman la materia vegetal, que evoluciona hacia la forma más impura de combustible fósil, la turba **2b**, que, pese a todo, se quema en grandes cantidades ya que su precio es irrisorio. Si la presión geológica, la temperatura y el tiempo aumentan, la transformación es imparable: lo que no era más que fibras vegetales acaba convertido en carbón o, más bien, en carbones, ya que los hay de muy diversos tipos. Aquí podemos ver lignito **2c**, hulla **2d** y antracita **2e**, progresivamente más puros y con menos azufre. Curiosamente, la «cocina geológica» también puede operar otros cambios químicos. Por ello explotamos el petróleo **2f**, en forma de crudo, y el gas natural **2g**, el más limpio de los combustibles, ya que no tiene azufre y, además, es rico en hidrógeno.

El carbono no es solo una fuente de energía para la tecnología. Es también el elemento de la vida y de la energía metabólica. Una quinta parte en peso de nuestro organismo está hecho de este ubicuo elemento. Además, moluscos **3a**, equinodermos **3b** o espongiarios **3c**, por citar solo tres ejemplos del reino animal, poseen esqueletos en los que el carbono es esencial. Y en el mundo de los vegetales la presencia del carbono es todavía más espectacular. Un tronco de madera es celulosa y lignina **3d**, polímeros a base de carbono. Y los frutos **3e** proporcionan todos los hidratos de carbono que alimentan a la humanidad. Los aceites, como el de oliva **3f**, han sido el hidrocarburo de la antigüedad clásica y el aderezo perfecto de las ensaladas de hoy; las ceras **3g** y resinas **3h**, los aditivos perfectos para todo tipo de artesanías.

En realidad, la biomasa vegetal de la biosfera es tan importante que nos suministra, con mínimas modificaciones, casi todo tipo de materiales. Quemar madera es de lo más simple y así seguimos. Un tronco **4a** es, por tanto, un combustible, que, convenientemente carbonizado, rinde el primer combustible técnico de la historia: el carbón vegetal **4b**, usado ampliamente por la civilización romana e idóneo hoy para la barbacoa. En las antípodas encontramos todavía algunas culturas que siguen utilizando los excrementos de los herbívoros **4c** a modo de combustible; es lógico, ya que es celulosa casi pura. De hecho, en las sociedades más desarrolladas hay un retorno a la biomasa como recurso energético renovable. Es por ello por lo que en el mercado encontramos astilla de madera **4d** y *pellets* **4e** algo más elaborados que alimentan nuestras calderas de agua caliente con unas emisiones de CO_2 asociadas que se consideran de balance nulo —porque si la biomasa procede de bosques gestionados con un plan forestal se incrementa la fijación de este gas de efecto invernadero.

Pasemos ahora a los materiales derivados del carbono y sus aplicaciones. El

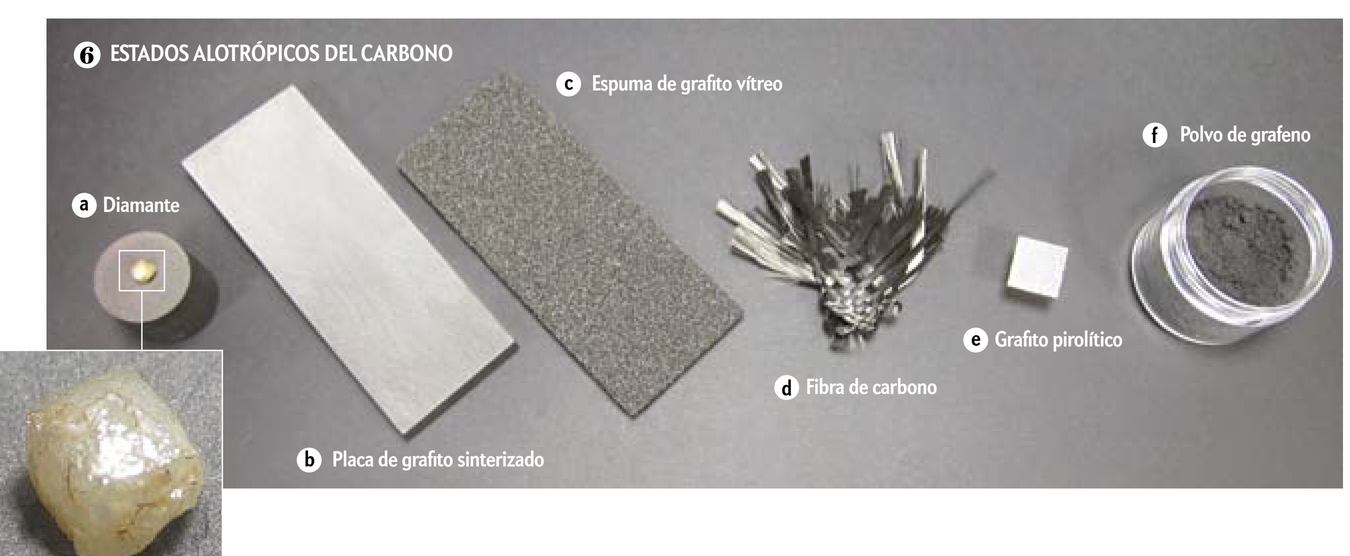




compuesto más fácil de fabricar a partir del carbono es quizás el CO_2. Este gas es a veces indeseable (como cuando aumenta en la atmósfera), pero tiene múltiples usos en la industria. Aquí lo vemos encerrado en un contenedor 5a que se emplea para inflar las ruedas pinchadas de las motocicletas. Más técnicos son otros compuestos, como las gomas o elastómeros de origen vegetal, el célebre caucho 5b, los plásticos que inundan el mundo en objetos de bajo coste 5c o los polímeros técnicos como el neopreno 5d. Pero no todo son productos baratos. El policarbonato 5e es tan tenaz que puede ser clavado. Ya en otro ámbito de cosas, estamos empezando a utilizar plásticos biodegradables en forma de, por ejemplo, cubiertos de un solo uso 5f. Finalmente, y solo por mor de completitud, con carbono ultra poroso hacemos carbón activado 5g capaz de adsorber todo tipo de sustancias indeseables en todo tipo de productos, desde el agua de boca hasta las cremas cosméticas.

Obsérvese cuan «poliédrico» puede resultar este elemento. Presenta una diversa fenomenología debida a sus propiedades químicas y físicas, de entre las que, para terminar, destacaremos la alotropía. En efecto, el carbono puede presentarse bajo diversos estados alotrópicos (misma composición química, diferente ordenación atómica), cuyas propiedades son radicalmente distintas. El diamante es la materia más dura conocida, como este cubo del Congo 6a encontrado en placeres aluviales. Es también casi transparente, aislante eléctrico y excelente conductor térmico. El alótropo grafito 6b, en cambio, es blando, opaco y negro, buen conductor eléctrico y térmico. Además, para aplicaciones técnicas lo podemos encontrar en estado vítreo, un estado de desorden atómico con el que se fabrican espumas ligerísimas 6c que se aplican en la construcción de aeronaves y cohetes.

Hasta aquí lo que conocíamos de siempre. Pero hoy disponemos de nanotubos de carbono (que hemos ejemplificado con una fibras de carbono 6d), de fullerenos (de los cuales no hemos podido conseguir muestras) e incluso de grafito pirolítico 6e (una sustancia altamente ordenada obtenida por crecimiento epitaxial, en la que millones de capas individuales se apilan y que presenta propiedades magnéticas fascinantes). Lo último en alotropía es el grafeno, un material aún más alucinante que promete ser estratégico en el futuro. Hoy solo lo podemos encontrar en forma de polvo 6f para usar a modo de aditivo en otros compuestos, pero pronto estará en todas partes, desde las pantallas táctiles hasta los electrodos que implantaremos en el cerebro para su estudio funcional. Una prueba más de la importancia del carbono y de su estudio sistematizado mediante una maleta didáctica. IyC



José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Einstein y la filosofía

La influencia del pensamiento filosófico en la construcción de las teorías de la relatividad

José Manuel Sánchez Ron

La relación entre ciencia y filosofía se remonta lejos en el pasado. De hecho, la ciencia nació de la filosofía tal y como esta se concibió en la antigua Grecia. Filósofo pero también científico fue Aristóteles —aunque en su física y cosmogonía dominó la especulación, más que la observación o la cuantificación—. Habida cuenta de semejante conexión genética, cabe preguntarse cuál fue esa relación una vez que la ciencia se configuró tal y como la entendemos en la actualidad; más concretamente, en qué medida los creadores de las grandes teorías científicas se vieron influidos por consideraciones, personajes o teorías procedentes de la filosofía.

Albert Einstein constituye un magnífico ejemplo en este sentido, ya que es posible identificar algunas de esas influencias en el camino que le llevó a construir sus dos teorías de la relatividad: la especial y la general.

Hume, Mach y la relatividad especial

Finalizados sus estudios en la Escuela Politécnica Federal (ETH) de Zúrich, Einstein pretendió seguir una carrera universitaria. Sin embargo, fracasó en su deseo y tuvo finalmente que aceptar en 1902 un empleo en la Oficina de Patentes de Berna. En esa ciudad entabló amistad con un rumano con intereses dispersos (que al mismo tiempo que los cursos universitarios de filosofía, literatura y filología griegas, seguía otros de matemáticas, física, geología, así como uno sobre la fisiología de los sentidos) de nombre Maurice Solovine (1875-1948), y con un suizo, Conrad Habicht (1876-1958), que había ido a Berna a terminar sus estudios de matemáticas.

Los tres solían reunirse en casa de Einstein. Una de las actividades de ese pequeño círculo, al que denominaron Academia Olimpia, era seleccionar libros para leerlos y comentarlos. Solovine se refirió a esas lecturas en la introducción al volumen en el que reunió la correspondencia que mantuvo con Einstein entre 1906 y 1955: «Hablando con él un día, le dije: "¿No crees que sería bueno que leyésemos juntos alguna obra de un gran maestro y que discutiésemos sobre los problemas que se tratan en ella?". "Esta es una idea admirable", me dijo. Le propuse entonces leer *La gramática de la ciencia* de Karl Pearson, lo que Einstein aceptó con placer».

Al libro de Pearson le siguieron el *Análisis de las sensaciones* y el *Desarrollo histórico-crítico de la mecánica* de Ernst Mach, la *Lógica* de John Stuart Mill, el *Tratado de la naturaleza humana* de David Hume, la *Ética* de Baruch Spinoza, algunas de las conferencias y memorias de Hermann von Helmholtz, capítulos del *Ensayo sobre la filosofía de las ciencias* de André-Marie Ampère, *Sobre las hipótesis que sirven de fundamento a la geometría* de Bernhard Riemann, parte de la *Crítica de la experiencia pura* de Richard Avenarius, *Sobre la naturaleza de las cosas en sí mismas* de William K. Clifford, *¿Qué son los números y para qué sirven?* de Richard Dedekin, *La ciencia y la hipótesis* de Henri Poincaré —un libro que, señalaba Solovine, «nos impresionó profundamente y mantuvo en vilo durante semanas»—, y bastantes obras más, entre ellas literarias, como la *Antígona* de Sófocles, los *Cuentos de Navidad* de Dickens y *El Quijote*.

En lo que se refiere a la influencia que tuvieron en la creación de la teoría de la relatividad especial, dos autores destacan: Hume y Mach. Una carta que Einstein escribió el 6 de enero de 1948 a otro de sus amigos de Berna, y del resto de su vida, el ingeniero italo-suizo Michele Angelo Besso (1873-1955), arroja luz sobre ello:

Querido Michele:
Tu carta es verdaderamente muy interesante, pero no es tan sencilla de responder. En lo que se refiere a Mach, debo distinguir entre su influencia en general y el efecto que produjo sobre mí. Mach realizó importantes trabajos especializados (por ejemplo, el descubrimiento de las ondas de choque, que se basa en un método óptico verdaderamente genial). Sin embargo, no queremos hablar de esto, sino de su influencia sobre la actitud general en relación con los fenómenos de la física. Su gran mérito es haber flexibilizado el dogmatismo que reinaba en los siglos XVIII *y* XIX *sobre los fundamentos de la física. Trató de mostrar, sobre todo en la mecánica y en la teoría del calor, cómo los conceptos surgen de la experiencia. Defendió con convicción el punto de vista según el cual estos conceptos, incluso los más fundamentales, no extraen su justificación más que de la experiencia, y no son, en modo alguno, necesarios desde el punto de vista lógico. Su acción fue particularmente beneficiosa en tanto que mostró claramente que los problemas más importantes de la física no son de naturaleza matemático-deductiva; los más importantes son los que se refieren a los principios básicos. Yo veo su punto débil en el hecho de que creía poco más o menos que la ciencia consistía únicamente*



ALBERT EINSTEIN en una conferencia celebrada en Viena, 1921.

en poner en orden el material experimental, es decir, que ignoró el elemento constructivo libre en la elaboración de un concepto. De alguna manera pensaba que las teorías son el resultado de un descubrimiento y no de una invención. Iba incluso tan lejos que consideraba las «sensaciones» no solamente como un material concebible, sino también, en cierta medida, como los materiales de construcción del mundo real; creía poder llenar así el abismo que existe entre la psicología y la física. Si hubiese sido completamente consecuente, no debería haber rechazado solamente el atomismo, sino también la idea de una realidad física.

En lo que se refiere a la influencia de Mach sobre mi pensamiento, ciertamente ha sido muy grande. Me acuerdo muy bien de que fuiste tú quien me llamó la atención sobre su tratado de mecánica y su teoría del calor, en los tiempos de mis primeros años de estudios, y que estas dos obras me produjeron una gran impresión. Hasta qué punto han influido sobre mi propio trabajo es algo que, francamente, no veo claro. Por lo que recuerdo, D. Hume ejerció sobre mí una influencia directa más grande. Lo leí en Berna en compañía de Conrad Habicht y de Solovine. Pero, como acabo de decir, no soy capaz de analizar aquello que quedó anclado en mi subconsciente. Por lo demás, es interesante señalar que Mach rechazó con encarnizamiento la teoría de la relatividad restringida. (Ya no vivía en la época de la teoría de la relatividad general.) Le parecía que la teoría sobrepasaba en especulación todo cuanto está permitido. No sabía que este carácter especulativo pertenece a la mecánica de Newton y, en general, a toda teoría imaginable. No hay más que una diferencia de grado entre las teorías, en la medida en que los caminos [que sigue] el pensamiento desde los principios básicos hasta las consecuencias comprobables por la experiencia son de longitud y complicación diferentes».

Hume, decía, ejerció sobre él una influencia mayor que Mach. Para entender la naturaleza de esta influencia hay que recurrir a la obra cumbre del filósofo escocés, *Tratado sobre la naturaleza humana* (1738). Allí, sobre el «espacio» decía que «no tenemos idea de ninguna extensión real sin llenarla con objetos sensibles» y que «la idea de espacio o extensión no es otra cosa que la idea de puntos visibles o tangibles dispuestos en cierto orden». En lo referente al «tiempo», afirmaba: «Allí donde no tengamos percepciones sucesivas no tendremos noción del tiempo, aunque haya una sucesión real en los objetos. A partir de estos fenómenos, así como de otros muchos, podemos concluir que el tiempo no puede aparecer ante la mente, ni aislado, ni acompañado por un objeto constantemente inmutable, sino que se presenta siempre mediante una sucesión perceptible de objetos mudables».

En la carta a Solovine, Einstein se mostraba crítico con Mach, aunque reconocía la influencia que ejerció sobre él. Pero hay que tener en cuenta que la misiva en cuestión data de 1948, y que, como veremos enseguida, la teoría de la relatividad general distanció a Einstein del físico-filósofo austríaco.

Más cercano al momento en el que creó la teoría relativista especial es lo que escribió a Moritz Schlick (1882-1936), un filósofo que hizo su tesis doctoral bajo la dirección de Max Planck. Schlick fundó el influyente Círculo de Viena (del que también formaron parte Rudolf Carnap, Otto Neurath, Herbert Feigl, Philipp Frank, Kurt Gödel, Friedrich Waismann, Karl Menger, Hans Hahn, Edgar Zilsel y Victor Kraft) y tuvo relación con Hans Reichenbach y Karl Popper. (Cabe mencionar que Carnap, Frank, Gödel, Reichenbach y Popper incluyeron la relatividad einsteiniana en no pocos de sus escritos.) En una carta que Einstein dirigió a Schlick (entonces *Privatdozent* de filosofía en la Universidad de Rostock) desde Berlín el 14 de diciembre de 1915, y en la que comentaba un artículo que este había publicado sobre el significado filosófico de la teoría de la relatividad («Die philosophische Bedeutung des Relativitätsprinzips», *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik*, 1915), se lee:

Su presentación de que la teoría de la relatividad se sugiere en el positivismo, aunque sin que la requiera [necesariamente], es [...] muy correcta. En esto también vio usted correctamente que esta línea de pensamiento tuvo una gran influencia en mis esfuerzos y, más concretamente, E. Mach, e incluso más Hume, cuyo Tratado sobre la naturaleza humana *había estudiado con avidez y con admiración poco antes de descubrir la teoría de la relatividad.*

Particularmente próximos al contenido de la teoría de la relatividad especial son algunos de los contenidos del *Desarrollo histórico-crítico de la mecánica* de Mach, en el que se criticaban las ideas que sobre el espacio y el tiempo Isaac Newton había desarrollado en sus *Principia*, considerándolos absolutos. Sobre el tiempo, por ejemplo, afirmaba que era «absoluto, verdadero y matemático, [que] en sí y debido a su naturaleza, fluye uniformemente y sin referencia a ningún objeto exterior». Para Mach, sin embargo, «el tiempo es más bien una abstracción a la cual llegamos por la variación de las cosas, debido a que no está señalada ninguna medida determinada, por estar todas las cosas vinculadas entre sí». Y otro tanto venía a decir acerca del espacio: «Nadie puede decir algo sobre el espacio absoluto o sobre el movimiento absoluto que no sean meras abstracciones sin manifestación posible en la experiencia. Todos nuestros enunciados fundamentales de la mecánica, como lo hemos mostrado detalladamente, son experiencias sobre posiciones y movimientos relativos de los cuerpos».

Las ideas que sostenía Mach eran coherentes con la filosofía antimetafísica que defendía. Las resumió en *Análisis de las sensaciones* (1886), donde sostenía que ya que toda la información que poseemos acerca del mundo exterior procede de las sensaciones de nuestros sentidos, estas deben constituir los elementos básicos sobre los que se construyan las teorías científicas. Para él, el conocimiento científico de la naturaleza debía consistir en encontrar las descripciones más simples posibles de las conexiones o relaciones existentes entre sensaciones.

En la teoría de la relatividad especial que Einstein presentó en 1905, espacio y tiempo eran relativos; dependían del estado de movimiento (inercial) del observador. Reivindicaban, en este sentido, tanto a Hume como a Mach.

Mach y la relatividad general

La teoría de la relatividad general es, al contrario que la especial (cuyos principios afectan a todas las fuerzas físicas presentes en la naturaleza), un edificio teórico que rige únicamente a la fuerza gravitacional. Completarla llevó a Einstein muchos esfuerzos y tiempo (lo logró en noviembre de 1915). Una de las guías a las que recurrió en esa búsqueda fue una idea que Mach empleó para combatir el espacio absoluto newtoniano, la de que «una teoría razonable [de] la inercia [...] debería descansar en la interacción de las masas», idea que vino en denominarse «principio de Mach». Así, el 25 de junio de 1913 Einstein escribía al propio Mach:

Probablemente haya recibido usted recientemente mi nueva publicación sobre relatividad y gravitación, que por fin terminé después de un trabajo inacabable y penosas dudas. El próximo año se verá en el eclipse solar si los rayos de luz son curvados por el Sol o, en otras palabras, si la suposición básica y fundamental de la equivalencia entre la aceleración de un sistema de referencia y un campo gravitacional es realmente válida. Si es así, sus inspiradas investigaciones sobre los fundamentos de la mecánica recibirán —a pesar de las injustas críticas de Planck— una espléndida confirmación. Ya que es una consecuencia necesaria [de mi teoría] el que la inercia tiene su origen en una especie de interacción mutua entre cuerpos, totalmente en el sentido de su crítica al experimento del cubo de Newton.

(El eclipse de Sol al que se refería Einstein iba a observarlo, desde Rusia, Erwin Freundlich. La expedición astronómica se organizó y Freundlich marchó a Rusia, pero con tan mala suerte que el mal tiempo y el comienzo de la Primera Guerra Mundial conspiraron por dos veces para que fracasara en sus intentos de conseguir las fotografías del eclipse. Todo su material fue confiscado y él mismo encarcelado, hasta que fue canjeado por algunos rusos detenidos en Alemania. Estaba de nuevo en Berlín a primeros de septiembre de 1914. Con el experimento del cubo, Newton pretendía demostrar que el espacio era absoluto.)

El entusiasmo de Einstein por Mach duraba todavía en 1916, esto es, después de que hubiese llegado a la formulación final de la relatividad general. El 19 de febrero de 1916, Mach fallecía, y en el obituario que Einstein preparó sobre él («Ernst Mach», *Physikalische Zeitschrift*, 1916), escribía: «No es improbable que Mach hubiera llegado a la teoría de la relatividad si, cuando su mente estaba todavía joven y fresca, la cuestión de la constancia de la velocidad hubiese atraído a los físicos [...]. Sus pensamientos relativos al experimento del cubo de Newton demuestran lo cerca que estuvo su espíritu de exigir la relatividad en general (relatividad de aceleraciones)».

Pronto, no obstante, ese entusiasmo desapareció, como demuestra el siguiente intercambio epistolar entre Einstein y Besso.

Einstein a Besso (29 de abril de 1917):

[Friedrich Adler] cabalga el pobre caballito de Mach hasta el agotamiento.

(Friedrich Adler era un físico y militante socialista revolucionario que fundó y dirigió el Partido Socialdemócrata austríaco. El 21 de diciembre de 1916 asesinó al primer ministro austríaco, el conde Karl von Stürgkh.)

Besso a Einstein (5 de mayo de 1917):

En lo que se refiere al caballito de Mach, no deberíamos insultarlo, puesto que ¿no hizo él posible la infernal jornada a través de las relatividades?

Y Einstein a Besso (13 de mayo de 1917):

Yo no prorrumpo en invectivas contra el caballito de Mach, pero sabes lo que pienso de él. No puede engendrar nada viviente, solo puede exterminar parásitos dañinos.

A partir de entonces, Einstein no dejó de mostrar la distancia que le separaba de la filosofía machiana; esto es, de hacer explícito cómo habían cambiado su filosofía de la ciencia, epistemología y metodología científicas. Así, en una carta que dirigió desde Princeton el 10 de abril de 1938 a Solovine, manifestaba:

En tiempos de Mach, un punto de vista materialista dogmático ejercía una dañina influencia sobre todo; de la misma forma, en la actualidad el punto de vista subjetivo y positivista ejerce una influencia demasiado fuerte. Se dice que la necesidad de concebir la naturaleza como una realidad objetiva constituye un prejuicio superado, mientras los teóricos cuánticos se vanaglorian. Los hombres son más sensibles a las influencias que los caballos, y cada período está dominado por una moda, con el resultado de que la mayoría de las personas no son capaces de ver al tirano que las dirige.

No se trataba, sin embargo, de que también él hubiese sucumbido a una moda filosófica imperante cuando era un joven e inexperto estudiante y científico primerizo. No. Hume y Mach realmente ayudaron a Einstein en la elaboración de la teoría especial de la relatividad así como en algunos apartados de la general. Lo que sucede es que, tras haber completado la relatividad general (un logro que le fascinó —con razón— mucho más que cualquier otro de los que llevó a cabo a lo largo de su carrera científica), Einstein se dio cuenta de que esta construcción teórica se armonizaba mal con los principios machianos: un ente fundamental de la teoría general era el concepto de campo, que no se puede reducir a las sensaciones machianas. Para la teoría de la relatividad especial valían las ideas de Mach, pero, en cierto sentido, esa teoría no constituía sino un primer paso en la explicación científica del mundo. Y cuando se avanzaba por este camino era preciso distanciarse, cada vez más, de los datos empíricos (de las «sensaciones») que nos suministra la naturaleza. Era, es, necesario, en definitiva, inventar —una palabra maldita para Mach— conceptos, que introducimos en nuestras teorías. IyC

PARA SABER MÁS

Lettres a Maurice Solovine. Albert Einstein. Gauthier-Villars, París, 1956.
The collected papers of Albert Einstein. Volume 5, The Swiss years: Correspondence, 1902-1914. Albert Einstein et al. Princeton University Press, 1993.
Correspondencia con Michele Besso (1903-1955). Albert Einstein. Editado por Pierre Speziali. Tusquets, Barcelona, 1994.
The collected papers of Albert Einstein. Volume 8, The Berlin years: Correspondence, 1914-1918. Albert Einstein, et al. Princeton University Press, 1998.

EN NUESTRO ARCHIVO

Sobre la teoría generalizada de la gravitación. Albert Einstein en *IyC*, noviembre de 2015 (*artículo histórico publicado por Einstein en* Scientific American *en abril de 1950 y traducido al español con ocasión del centenario de la relatividad general*).

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

La poesía visual matemática de Cristóbal Vila

Las animaciones digitales del artista zaragozano enseñan a disfrutar de la belleza de las matemáticas a través de la naturaleza, la arquitectura y el arte

Este mes me gustaría presentarles la obra del zaragozano Cristóbal Vila, un mago de las animaciones en 3D. Mi intención es sencillamente que conozcan y disfruten de sus cortometrajes digitales, dedicados a presentar la matemática y la ciencia con un genial pulso poético.

Vila, que se define como autodidacta, realizó sus primeros trabajos en animación a finales de los años noventa. Ya en 2003 alumbró *Snakes*, «Serpientes», un homenaje a M. C. Escher basado en la última obra del holandés, realizada en 1969 y de título homónimo.

El grabado original en madera representa la última exploración de Escher sobre el infinito y las geometrías hiperbólicas. Muestra un disco formado por anillos entrelazados que van disminuyendo de tamaño tanto si nos acercamos al centro como si nos movemos hacia los bordes. La presencia de tres serpientes enroscadas en la estructura introduce una simetría rotacional de orden tres y genera esa mezcla orgánico-matemática tan característica de las creaciones del artista holandés.

En su corto, Vila nos revela los entresijos geométricos de aquella obra dándole vida en 3D. En particular, detalla la estructura de los anillos entrelazados, en los que tres serpientes acabarán colocándose en las posiciones simétricas que les otorgó Escher. La obra está aderezada con música de Erik Satie, el pianista de los surrealistas.

Aunque este primer corto de Vila ya apuntaba maneras, sería su siguiente obra matemática, *Nature by numbers*, la que le reportaría éxito internacional.

Nature by numbers (2010)

Vila describe esta animación de 3 minutos y 44 segundos con el subtítulo «Un cortometraje inspirado en los números, la geometría y la naturaleza». El vídeo se divide en tres partes: la sucesión y la espiral de Fibonacci; la proporción y el ángulo áureos; y la triangulación de Delaunay y las teselaciones de Voronoi.

Tras presentar la secuencia de Fibonacci, que comienza con dos unos y en la que cada elemento posterior viene dado por la suma de los dos números inmediatamente anteriores,

$$1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55\ldots ,$$





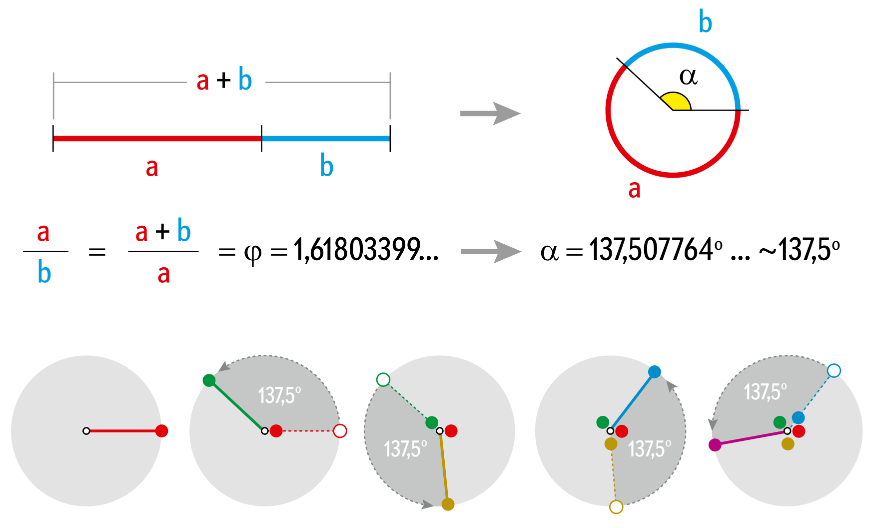
1. DOS FOTOGRAMAS de la animación *Snakes* (2003), un homenaje a la obra homónima de M. C. Escher. En el cortometraje, tres serpientes se desplazan (*izquierda*) hasta adoptar una posición final con simetría rotacional de orden tres (*derecha*).

Vila disecciona un plano siguiendo dicha secuencia para construir una espiral de Fibonacci, la cual usa como aproximación a la espiral áurea. Para que los empalmes no se vean discontinuos, los corrige empleando curvas de Bézier [*véase* «Tipografía digital», por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, julio de 2017].

Acto seguido salta a la tercera dimensión para construir la concha de un nautilo. En su página web confiesa que, en el proceso, descubrió la falsedad de una de las muchas afirmaciones, no exentas de misticismo, que rodean a este número milenario: los nautilos no crecen siguiendo una espiral áurea. Y aunque Vila reniega de la llamada «geometría sagrada», tachándola de pseudomatemáticas, el trabajo ya estaba hecho, por lo que decidió mantener el cefalópodo como licencia poética.

En la segunda parte de la animación introduce el concepto de rectángulo áureo a través de su construcción clásica y, a partir de él, define el ángulo áureo tal y como se muestra en la figura 2. A continuación llega la que, para mí, es una de las secuencias más conseguidas del corto: la formación del patrón espiral que siguen las semillas de un girasol, algo extremadamente complicado de explicar con palabras.

La tercera parte de la animación trabaja con las teselaciones de Voronoi, estructuras que emergen en muchos sistemas, como las alas de insectos o la capilaridad de las hojas de las plantas y que, ya puestos, trataremos con detalle en una próxima columna. El resultado final es una obra maestra.



2. SI DIVIDIMOS UN SEGMENTO UNIDAD en dos partes *a* y *b* tales que $a/b = (a + b)/a$, obtendremos el número áureo, φ. Si ahora construimos una circunferencia con nuestro segmento, el arco de longitud *b* subtiende un «ángulo áureo» α, con valor aproximado de 137,5° (*arriba*). Para obtener el patrón espiral de las semillas de un girasol, agregamos una primera semilla (*abajo, rojo*). Después giramos un ángulo áureo y añadimos una segunda (*verde*), al tiempo que desplazamos la primera hacia el centro. Al repetir el proceso, obtendremos la distribución espiral de semillas característica del girasol y de otras plantas.

Inspirations (2012)

Dos años después, Vila volvió a sorprendernos con un cortometraje inspirado en Escher. En sus propias palabras: «Cuando comencé a idear esta animación tenía la intención de darle vida a un gran y extenso bodegón, recorriéndolo de un modo similar a aquella fantástica introducción creada para los títulos de crédito de la película *Delicatessen*. Pero me faltaba el motivo, los protagonistas de la acción. Así que volví a mirar hacia esa enorme e inagotable fuente de inspiración que es Escher y traté de imaginar cómo pudo haber sido su lugar de trabajo, de qué cosas se rodearía un artista como él, tan profundamente interesado por la ciencia en general y por las matemáticas en particular. Todo ello, eso sí, de forma completamente imaginaria, libre e inventada».

Cuando vi por primera vez este corto me quedé impactado: no sé si el gabinete de maravillas matemáticas que Vila nos presenta se asemeja o no al que fuera el estudio de Escher... ¡pero desde luego que sí se parece al mío! Y sospecho que buena parte de los objetos que aparecen estarán presentes en los despachos de matemáticos y científicos de todo el mundo. En la figura 3 he seleccionado algunos de los que muestra el cortometraje para llamar la atención sobre ellos y retar al lector: ¿los conoce? Las respuestas, en la próxima columna.

Ars qubica (2015)

Era cuestión de tiempo que la comunidad matemática acabara buscando la colaboración de Vila. *Ars qubica* fue el resultado: guion de los matemáticos Fernando Corbalán y Luis Rández, dirección del proyecto del también matemático Pedro Miana, y producción del Instituto Universitario de Matemáticas y Aplicaciones de la Universidad de Zaragoza.

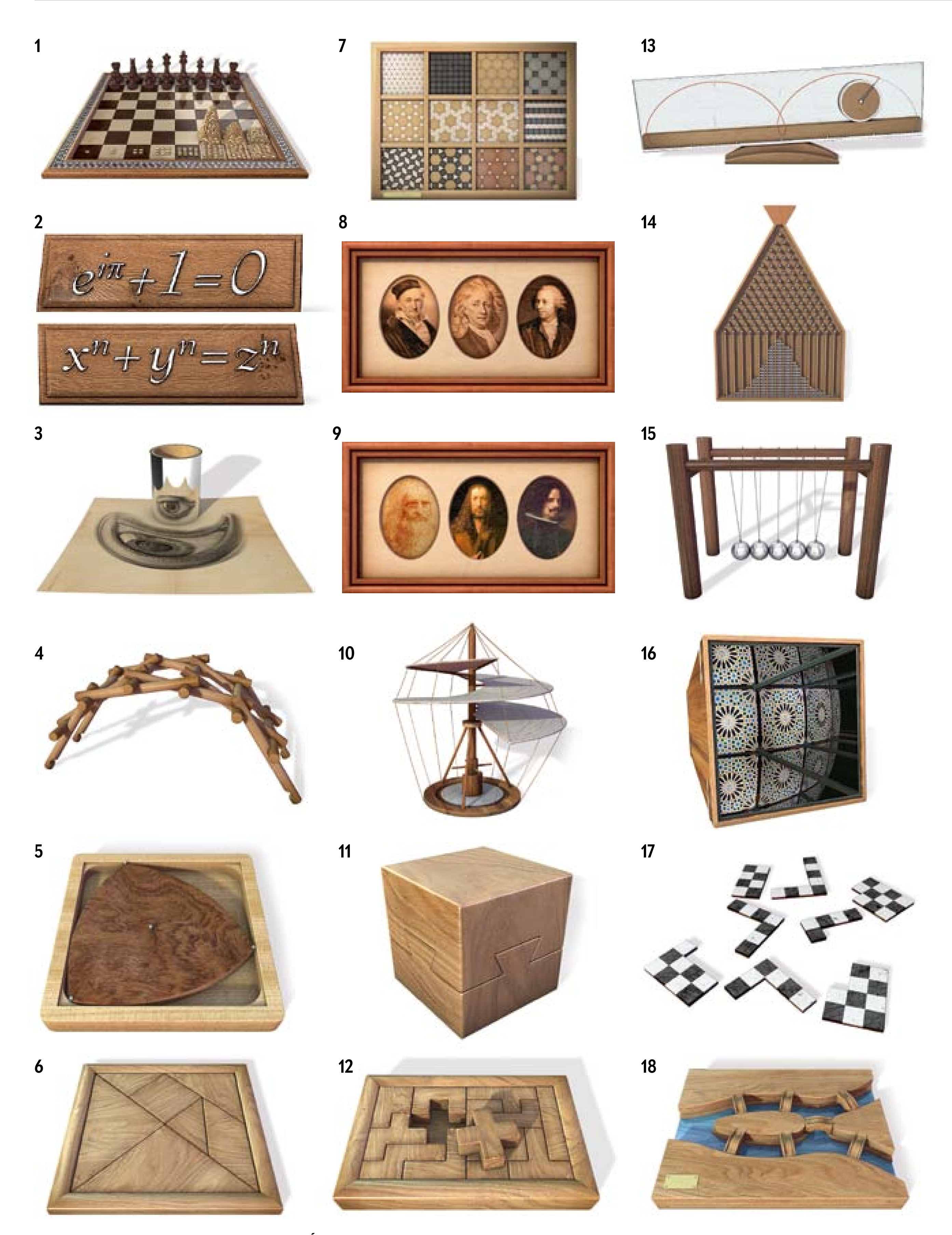
«El planteamiento básico de *Ars qubica* es transmitir la presencia de la geometría y las matemáticas en el arte. Para ello se utiliza como hilo conductor el cubo; una figura geométrica que, al ser cortada por un plano, puede dar lugar a un cuadrado, un triángulo equilátero, un pentágono irregular o un hexágono. También comprobamos cómo esas secciones están presentes en distintas obras artísticas y ornamentales», señala Vila.

En esta animación aparecen conocidos cuadros de dos corrientes vanguardistas rusas de principios del siglo xx, el constructivismo y el suprematismo, con los que Vila juega para formar teselaciones, como el clavo o el pájaro nazaríes, la teselación de El Cairo o azulejos de Gaudí. La recreación de la fachada mudéjar de la Seo, la Catedral del Salvador de Zaragoza, resulta sencillamente espectacular.

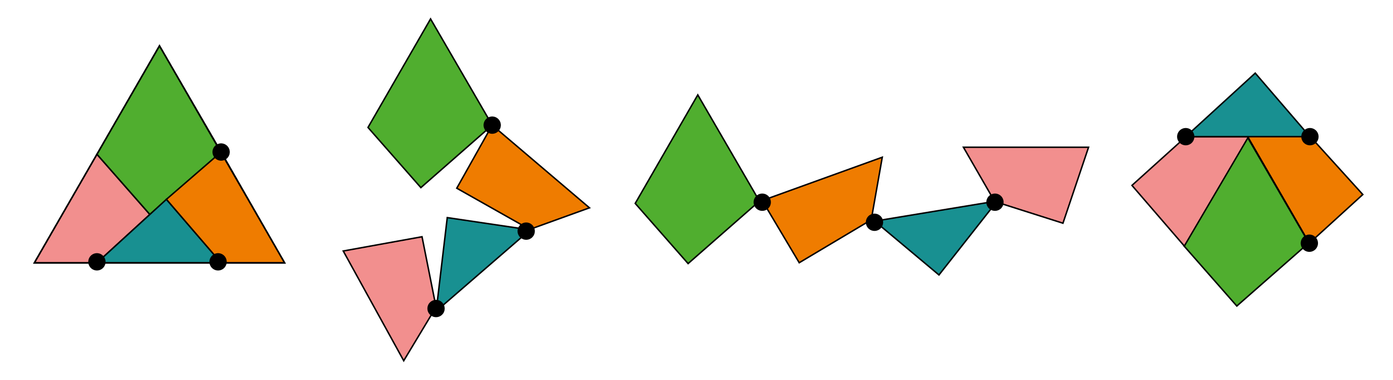
El cortometraje se regala en los detalles de la archiconocida obra de Durero *Melancolía I*, de 1514, en la que aparece un cuadrado mágico cuyas filas y columnas siempre suman 34. A modo de homenaje, culmina con un pseudo cuadrado mágico que su propio creador, Luis Rández describe así: «No es realmente un cuadrado mágico 4 × 4 en sentido estricto, ya que los números no son 1, 2, 3, ..., 16, como en el cuadrado de Durero. También tiene ligaduras para ZA-RA-GO-ZA (primer bloque 2 × 2, dos primeras filas y columnas) y para el año 20-15. Por tanto, la mejor manera de crearlo es a partir de las ecuaciones “suma en filas” = “suma en columnas” = “suma en la diagonal” = “suma en la contradiagonal”, y todo eso igual al primer bloque 2 × 2, que da 192». ¿No se entiende muy bien? Vean el corto y analicen la figura 4.

Infinite patterns (2019)

Acabemos con la creación más reciente de Vila, *Infinite patterns*. En sus propias



3. DEMUESTRE SU CULTURA MATEMÁTICA: ¿Reconoce los siguientes objetos o personajes que aparecen en el cortometraje digital *Inspirations* (2012)? Las soluciones, en la próxima columna.



5. EN UNA DISECCIÓN GEOMÉTRICA ABISAGRADA, todas las piezas están unidas en una cadena por puntos «articulados». En esta figura, inspirada en el cortometraje *Infinite patterns* (2019), podemos ver la conversión de un triángulo en un cuadrado. Esta transformación fue popularizada a principios del siglo XX en forma de pasatiempo por el matemático británico Henry Dudeney. ¿Se le ocurre cómo convertir el triángulo en un hexágono siguiendo este método?

24	84	73	11
60	24	19	89
10	64	85	33
98	20	15	59

4. PSEUDO CUADRADO MÁGICO creado por el matemático Luis Rández para la animación *Ars qubica* (2015)

palabras: «Pretende establecer conexiones entre varios ámbitos que me interesan profundamente: la geometría y cómo esta aparece ligada a la naturaleza, por un lado, y al arte y a la arquitectura, por otro. [...] De alguna forma, supondría la fusión entre los intereses de dos de mis trabajos anteriores, *Nature by numbers* y *Ars qubica*».

El cortometraje comienza con un punto —«la unidad mínima de comunicación visual», como señala el autor—, el cual se transforma en un segmento con el que se obtiene el polígono regular más simple de todos: el triángulo equilátero. Este se transforma mediante disecciones abisagradas en un cuadrado y después en un hexágono, todos ellos de idéntica área. Se trata de los tres únicos polígonos regulares capaces de embaldosar por sí solos el plano.

Seguidamente Vila nos muestra que el hexágono es la figura con menor perímetro de las tres y tesela el plano con ella, rindiendo así homenaje a la «conjetura del panal de abejas». Esta afirma que teselar con hexágonos constituye la mejor manera de dividir una superficie en regiones de igual área y con el mínimo perímetro total (la conjetura, conocida desde la Antigüedad, no fue demostrada definitivamente hasta 1999).

Al pasar la teselación hexagonal a 3D, Vila se recrea con un panal de abejas, donde existe una relación óptima entre el volumen de las cavidades y la cera necesaria para construir las paredes. Tras ello regresa a la teselación en 2D y, mediante una sucesión de operaciones geométricas, la transforma en uno de los mosaicos embaldosados de la Sala de los Reyes de la Alhambra de Granada. Desde ella accedemos al Patio de los Leones, donde asistimos al florecimiento de una margarita que brota de una grieta del mármol blanco y con la que Vila vuelve a abundar en el ángulo áureo, como ya hiciera con los girasoles de *Nature by numbers*.

De nuevo aparece la abeja y la cámara nos acerca a sus ojos facetados, compuestos por estructuras llamadas omatidios y distribuidas según un patrón también hexagonal. Y ahora, genialmente, Vila usa las facetas del ojo del insecto para generar las fórmulas estructurales de la guanina, la citosina, la adenina y la timina, que cuentan en todos los casos con un hexágono central. La animación continúa con el enlace de las bases para formar una cadena de ADN, en torno a la cual aparecen varias líneas helicoidales de luz que acaban transformándose en la famosa Escalera de Bramante de los Museos Vaticanos, una de las pocas escaleras de doble hélice que existen en el mundo.

Otra maravillosa transformación basada de nuevo en el ángulo áureo permite a Vila hacer aparecer de su chistera una palmera, que por arte de birlibirloque digital acaba mutando en la capilla del King's College de Cambridge. Tras un pequeño recorrido, acabamos en una gran rosa de piedra que, tras abrirse como si estuviera viva, marca el final del corto.

En la página web del artista, además de todas sus obras podrá encontrar también una sección llamada «Los conceptos tras...», donde el autor nos explica el entramado técnico-conceptual de cada cortometraje con menos premura y más detalles que esta columna.

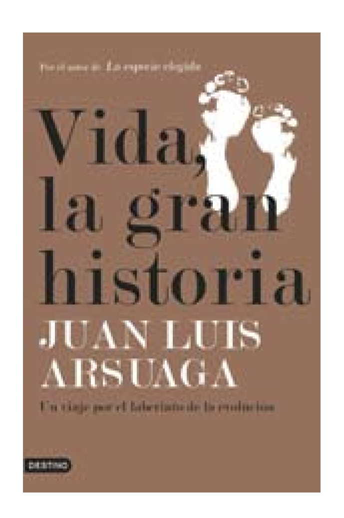
Por mi parte, a partir de ahora no pienso perder la oportunidad de presentar la obra de Cristóbal Vila en mis cursos. A fin de cuentas, ¿que desea todo profesor de matemáticas, sino transmitir a sus alumnos la poesía y la belleza que esconde este arte? IyC

PARA SABER MÁS

Página web de Cristóbal Vila: **etereaestudios.com**
Entrevista con Cristóbal Vila. Entrevistas 360. Disponible en **www.youtube.com/watch?v=pvG3GNHtA1Y**
Animación 3D: Un proceso creativo. Conferencia de Cristóbal Vila en la Universidad de Zaragoza. Disponible en **www.youtube.com/watch?v=zb10UiKtG5g**
Los conceptos detrás de *Infinite patterns*. Cristóbal Vila en **naukas.com/2019/10/06/los-conceptos-detras-de-infinite-patterns**, 6 de octubre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Galería de grabados. Bartolo Luque en *IyC*, mayo de 2017.
Arte con números. Stephen Ornes en *IyC*, octubre de 2018.
Cuando las plantas hacen matemáticas. Teva Vernoux, Christophe Godin y Fabrice Besnard en *IyC*, abril de 2019.



VIDA, LA GRAN HISTORIA
UN VIAJE POR EL LABERINTO DE LA EVOLUCIÓN
Juan Luis Arsuaga
Destino, 2019
592 págs.

Arsuaga, el Arguiñano de la evolución

Ingredientes para desentrañar una historia de miles de millones de años

Si yo les preguntara cuál de estos dos animales se parece más a un cocodrilo, un flamenco o una tortuga, ¿qué me responderían? Estoy bastante convencida de que muchos de ustedes optarían por la tortuga. Al fin y al cabo, ambos tienen una piel parecida, avanzan de manera parecida por el suelo y parecen dinosaurios modernos. Sin embargo, son los flamencos los que están más estrechamente emparentados con los cocodrilos. Esto solo puede saberse si se analiza el registro fósil y se conoce la ecología de hace miles de años, algo que corresponde al trabajo de un paleontólogo.

Los paleontólogos son los grandes historiadores del pasado biológico, aquellos capaces de hacernos ver los mismos elementos con una mirada nueva: haciendo que nos fijemos en que la diferencia crucial entre dos especies tal vez sea la cáscara de sus huevos, indicándonos que quizás un evento geológico separase algunas especies y las acabase distanciando biológicamente, o recordándonos que una especie parecida ya existió hace millones de años y que la nueva que vemos hoy no es más que una solución repetida de la naturaleza.

Sin embargo, una reconstrucción así del pasado es compleja. Deja muchos cabos sueltos, da lugar a ideas contrarias a la lógica que reclaman nuestros ojos, y desde luego se encuentra muy alejada de la narración clásica que nos enseñaron en el colegio, donde la evolución se nos mostraba como un camino largo y recto de sustitución de unas especies por otras y que siempre terminaba en el origen del hombre. Representando así la historia de la vida, como un camino recto que termina en el humano triunfal, es muy habitual que uno se pregunte por qué los monos no se han convertido en hombres, y más habitual aún que encontremos cierta resistencia a creer que el flamenco y el cocodrilo se parezcan más que este y la tortuga. Un camino así, escalonado, resulta más fácil de entender que cualquier cuadro de Escher, donde las escaleras suben y bajan, se entrecruzan o desaparecen.

Sin embargo, ese aspecto escheriano es el que verdaderamente tiene la historia de la vida, y para descifrarlo necesitamos a alguien que nos ayude a responder todas las preguntas. Esa es la misión de Juan Luis Arsuaga, que en este libro toma de la mano tanto al público curioso como al especializado para ayudarle a recorrer, poco a poco y con paciencia, la compleja historia de la vida.

Aunque se trata de un gran reto, a lo largo de las casi 600 páginas de la obra y acompañado de las estéticas ilustraciones minimalistas de Susana Isabel Cid Martínez, Arsuaga logra recorrer miles de millones de años. El resultado es un viaje al pasado con una mirada actualizada a los hallazgos y debates más recientes. Durante la lectura, uno se da cuenta de que es demasiado ingenuo, por no decir egocéntrico, habernos situado como especie siempre en la meta final, en ese último peldaño de la escalera. Porque —y este es un gran *spoiler*— la historia de la vida no tiene ningún final ni dirección posible. Los letreros de *One way* típicos de la topografía neoyorquina no son más que un invento humano que se aplica a las calles, pero no al gran camino de la evolución.

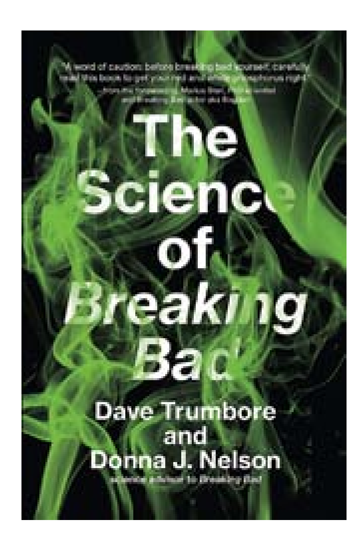
Leer este libro es sentirse por fin empequeñecido como especie, pero también engrandecido por haber entendido que todo no es más que una relación continua entre seres, paisajes y eventos. A mí en concreto me hace imaginar un espacio de vectores enmarañados donde todo se relaciona con todo. Me hace preguntarme también si los planes corporales, o la imposibilidad (hasta ahora) de que existan carnívoros con cuernos o dragones que escupan fuego no serán tal vez una mera restricción química, la misma que solo permite la vida a través del oxígeno. ¿Vendrá el nuevo conocimiento de la bioquímica? ¿De descifrar ese polvo de estrellas que lo es todo y donde las ecuaciones más complejas estarán dentro de nosotros mismos?

Al final, un libro de paleoantropología se convierte en uno de filosofía, un acto de humildad donde uno entiende que la grandeza de vivir es comprender que no hay argumento para la vida. La obra incluso reserva un apartado para el futuro. Al fin y al cabo, resulta muy tentador intentar prever qué vendrá, y más en un momento donde triunfan series como *Black mirror* o *Years and years*. No haré aquí otro destripe, pero sí añadiré que un bonito aspecto del libro es que, para hablar del futuro, Arsuaga nos reconduce la mirada al presente, pues la responsabilidad de una parte del futuro se encuentra hoy en nuestras manos.

Vida, la gran historia se plantea una tarea tan difícil como bien conseguida. Esto solo es posible porque Arsuaga es un gran científico, y como tal tiene tres cualidades: duda (se pregunta y no impone sus afirmaciones), acoge (admite que otras explicaciones varíen sus ideas iniciales) y construye (expone sus críticas para avanzar en el conocimiento en vez de para demostrar que tenía razón). Arsuaga no solo cumple con esas tres cualidades, sino que suma también la capacidad de hacer fácil lo difícil.

Una vez terminado el libro, el lector será capaz de incluir en la sobremesa del domingo la palabra *sinápsido* tan fácilmente como *tomate*. Y no solo eso: será capaz de formarse su propia opinión sobre varios debates evolutivos, ya que el autor le ha presentado los datos, le ha ayudado a pensarlos y le ha permitido que con esos ingredientes cocine su propia tortilla. De modo que, en efecto, Arsuaga es «el Arguiñano de la evolución», ya que genera familiaridad y sensación de autonomía. Solo faltarían los chistes del cocinero vasco, pero la historia es tan entretenida que divierte por sí misma.

—Nereida Bueno Guerra
Universidad Pontificia de Comillas



THE SCIENCE OF *BREAKING BAD*

Dave Trumbore y Donna J. Nelson
MIT Press, 2019
264 págs.

Las magistrales clases de química de Walter White

Ciencia muy real a través de la aclamada serie Breaking Bad

Puede resultar cuando menos irónico que Walter White (interpretado por el actor Bryan Lee Cranston), protagonista de la serie revelación *Breaking Bad*, eligiese a un físico (Werner Heisenberg) como pseudónimo para su carrera como químico al margen de la ley. Porque si hay una ciencia protagonista de la afamada serie, es sin lugar a dudas la química. Si bien el veterano profesor de química y novel fabricante de metanfetamina es fruto de la ficción, la química que enseña y utiliza a lo largo de la serie se revela bastante real. Parte de ese mérito se debe al asesoramiento científico de Donna J. Nelson, profesora de química de la Universidad de Oklahoma que además fue presidenta de la Sociedad Americana de Química en 2016. Nelson y el escritor Dave Trumbore son los autores de este libro sobre la ciencia que subyace a la serie publicado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Un texto imprescindible para descubrir la química que se esconde tras las aventuras de Heisenberg y su no siempre fiel compañero Jesse Pinkman (interpretado por Aaron Paul Sturtevant).

La presencia de la química en *Breaking Bad* puede detectarse desde los primeros capítulos. Ya en el segundo episodio podemos observar a Walter White explicando a sus alumnos el concepto de quiralidad a través de dos complejos de cobalto con etilendiamina, amoniaco y bromo como ligandos. Acto seguido, enfatiza a sus estudiantes la importancia de la quiralidad a través del dramático caso de la talidomida. Y en ese mismo capítulo, otro compuesto protagonizará la escena en la que una bañera donde White y Pinkman estaban descomponiendo un cadáver con ácido fluorhídrico (traducido como «ácido hidrofluórico» en la versión en castellano de la serie) se desploma desde el piso superior a la planta baja. Pinkman, asombrado de lo ocurrido, encuentra la explicación en el comentario de White, quien recrimina a su ingenuo ayudante no haber usado un bidón de plástico (teflón) para descomponer el cadáver, ya que el ácido fluorhídrico ataca la madera (como la del suelo), la materia orgánica (como la del cuerpo a descomponer) y los metales (como el arma que acompaña al cadáver).

Esta es una de las escenas analizadas por Trumbore y Nelson en el libro. Tal y como explican los autores, en la Universidad de California en Berkeley se llevó a cabo un experimento controlado en el que se simularon las condiciones de la escena: durante ocho horas se trataron con ácido fluorhídrico muestras de madera (para simular el material del suelo que, en la serie, atravesó la bañera), metales (para simular la pistola) y carne de cerdo (el cadáver). A diferencia de lo que ocurriría en la serie, ninguna de las muestras se disolvió por completo. En consecuencia, los autores explican que hubiera sido más recomendable que White y Pinkman empleasen bases fuertes para asegurar la desaparición completa del cadáver, apuntando que dicho método es el que realmente utilizan los cárteles de la droga.

Aunque dicha escena muestra una licencia con respecto a la ciencia real, no ocurre lo mismo con el resto de la serie. Tal y como ilustran Nelson y Trumbore en poco más de 200 páginas, las prácticas y conocimientos de química que exhiben White y Pinkman en los 62 episodios constituyen un buen ejemplo de apropiación de la ciencia en la ficción. En *Breaking Bad* esa ciencia gira en torno a la síntesis de metanfetamina, para lo cual la pareja utiliza sustancias como fósforo rojo (que obtienen de cajetillas de cerillas) o yodo (de productos desinfectantes). También aparecerán otras, como la fenilacetona, que emplean como agente reductor; el fosfano, cuya toxicidad puede ser apreciada en los primeros capítulos; o el fulminato de mercurio, responsable de una explosión que resultaría tremendamente beneficiosa para White.

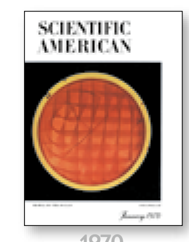
No toda la química que subyace a *Breaking Bad* está vinculada a la obtención de la ansiada metanfetamina azul (color debido a las impurezas). También podemos encontrar a White impartiendo una clase sobre la importancia del carbono para la vida e incluso explicando algo de historia de la química a sus estudiantes, como la producción de diamantes sintéticos por Tracy Hall a mediados del siglo pasado. Y no solo de química se nutre *Breaking Bad*. Como explican los autores, el lector podrá adentrarse en algunos aspectos de la biología, de la toxicología o de la física. A partir del análisis de escenas de la serie, Nelson y Trumbore sintetizan las ideas científicas clave, matizando y ampliando las explicaciones ofrecidas por el mismo profesor White.

The science of Breaking Bad constituye así una lectura amena y didáctica para adentrarse en cuestiones científicas, al tiempo que permite reflexionar sobre el papel de los límites legales y morales de la actividad científica o sobre cómo la ciencia puede contribuir a crear historias atractivas y capaces de seducir al gran público. Desde esta perspectiva, la obra se revela también como un recurso educativo de gran interés para el profesorado de ciencias que desee hacer uso de la ficción como herramienta pedagógica. El trabajo de Nelson y Trumbore nos muestra cómo las aventuras de Heisenberg y Jesse proporcionan una buena excusa para hablar de síntesis orgánica, de las formas alotrópicas de los elementos químicos o de la electroquímica de una batería, entre otras muchas cuestiones. Sin duda, un libro imprescindible en la biblioteca de todos aquellos adeptos a la historia de Walter White que quieran descubrir dónde estaba la línea entre la ficción y la realidad desde una mirada científica.

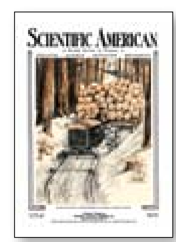
—Luis Moreno Martínez
Instituto Interuniversitario López Piñero
Universidad de Valencia

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

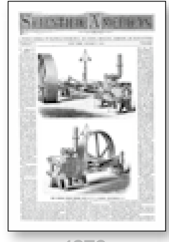
ENERO



1970



1920



1870

1970

Normas para la guerra química

«El anuncio del presidente Nixon relativo a las armas químicas y biológicas descartaba la guerra bacteriológica y el primer uso de armas químicas letales e "incapacitantes". La declaración, empero, no cambiaba la política estadounidense sobre dos armas de enorme importancia que se utilizan hoy de forma rutinaria en Vietnam: el gas lacrimógeno y los defoliantes químicos. Respecto a la guerra biológica, la renuncia fue unilateral e inequívoca. El presidente indicó que la investigación en esta materia se limitaría a las medidas defensivas y que se destruirían las reservas estadounidenses de armas bacteriológicas.»

1920

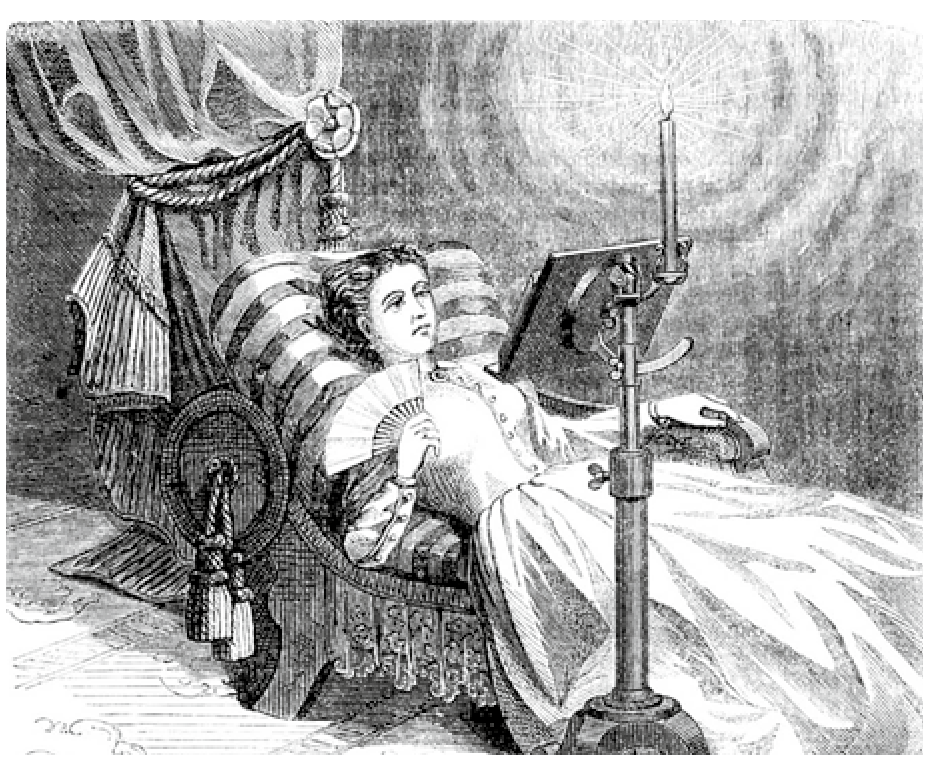
Lamer los sellos

«En el número de octubre de 1919 de *Medical Times*, se discute acerca de "El sello de correos como posible foco de infecciones". Los análisis de laboratorio demostraron que ningún sello se hallaba libre de microbios. Entre estos había bacilos del colon [del género *Escherichia*], estafilococos, estreptococos, neumococos y bacilos difteroides. No pudo establecerse el grado de peligrosidad que presentaban esos microorganismos ya que, por desgracia, no se llevaron a cabo pruebas para determinar su virulencia. La revista *American Medicine* ha comentado esos resultados y, sin animar a la práctica habitual de humedecer los sellos con la lengua, señala que si estos fueran peligrosos focos de infección, un gran porcentaje de la población estaría sin duda enferma por su causa.»

1870

Soporte para la lectura

«El adelanto que aquí ilustramos será considerado un lujo del que pocas personas, sanas o enfermas, que lo hayan disfrutado una vez estarán dispuestas a prescindir. El dispositivo permite leer, esté uno sentado o recostado, de tal modo que el texto queda directamente frente a los ojos, y en tal posición que no se requiere esfuerzo muscular alguno para sujetar el libro ni tampoco exige mantener el cuerpo erguido. El invento fue patentado, a través de la agencia de patentes de *Scientific American*, por Edward Conley, de Cincinnati (Ohio).»



1870: Un invento patentado (y, sobre todo, superfluo): un soporte para la lectura.

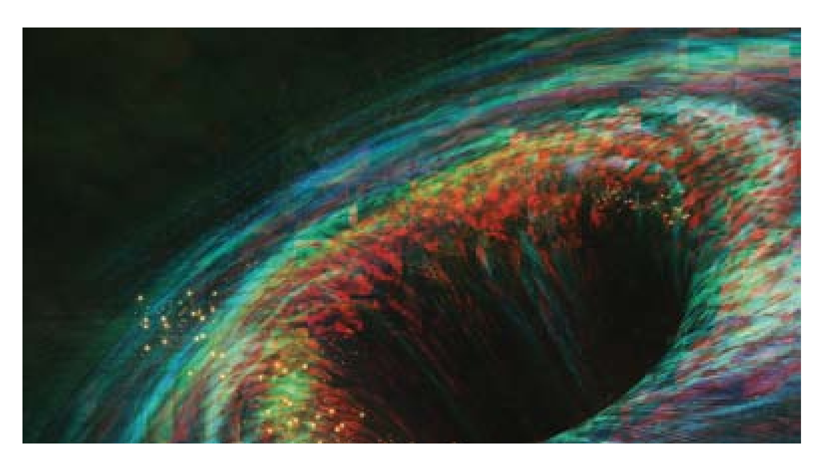
Hornos de petróleo

«La Academia Francesa encargó a Henri St-Claire la realización de una serie de experimentos sobre el uso del petróleo como combustible, los cuales él culminó con la invención de un horno que cumple satisfactoriamente ese fin. Puede asegurarse sin temor que se trata de uno de los inventos más importantes del año.»

El futuro canal de Panamá

«Tarde o temprano, un canal de navegación deberá conectar el Atlántico y el Pacífico. El tiempo dirá cuál de las rutas que se han estudiado hasta ahora será seleccionada finalmente como la más favorable [...] Tres han sido muy debatidas, y nuestro conocimiento general sobre ellas, obtenido a partir de estudios anteriores, basta para ofrecer una idea de su viabilidad. La ruta de Panamá implica solo 45 kilómetros de construcción, pero conlleva dificultades que, aunque no son insuperables, son de gran magnitud. La de Nicaragua, a través del río San Juan y el Gran Lago de Nicaragua, necesita solo 26 kilómetros de construcción, pero implica mejorar la navegación del río y, sin duda, también la del lago. La tercera vía, llamada ruta de Tehuantepec, tiene unos 210 kilómetros de longitud y es probable que haya menos conocimiento exacto sobre ella que sobre cualquiera de las otras. Estando así las cosas, el Gobierno ha actuado sabiamente enviando un buque a Colón para emprender estudios y obtener más luz.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XXII, N.º 2, 8 DE ENERO DE 1870



FÍSICA

La fuga del agujero negro

Steven B. Giddings

Salvar la mecánica cuántica exige que la información escape de los agujeros negros. Las nuevas observaciones pueden ayudarnos a entender cómo.





INFRAESTRUCTURAS

ALBA: luz ultraprecisa para investigar la materia

Caterina Biscari, Gastón García, Ana Belén Martínez y Ramón Pascual

Una de las mayores infraestructuras científicas españolas cumple diez años. Sus contribuciones han permeado todos los campos de la ciencia, desde la biología hasta la física de materiales.



COGNICIÓN

Proust entre las máquinas

Christof Koch

¿Podrán los ordenadores experimentar el mundo de una manera consciente?

BIOLOGÍA

La célula invulnerable

Rowan Jacobsen

Los biólogos están construyendo una bacteria inmune a todos los virus. Lo siguiente podrían ser células humanas inexpugnables.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN
Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES
Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

ACTING EDITOR IN CHIEF Curtis Brainard
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Javier Grande: *Apuntes* y *El observatorio Kagra*; Andrés Martínez: *Apuntes, Mapa mundial de los nematodos del suelo, Colombia: del conflicto a la economía verde, El rostro de un australopiteco, Bosques contra la crisis climática* y *Con un ojo abierto*; José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes, La dinámica del discurso de odio en Internet* y *Un archivo universal que cabría en un huevo*; Miguel A. Vázquez Mozo: *Cristales en el tiempo*; Bartolo Luque: *¿Es inevitable la desigualdad?*; Alfredo Marcos: *¿Hay ciencia en las medicinas alternativas?*; M. Gonzalo Claros: *La epigenética, moduladora clave de la evolución*; Claudi Mans: *Carbono: el elemento estrella*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España